

Popis atmosférické cirkulace pomocí vícerozměrných statistických metod

habilitační práce

RNDr. Radan Huth, DrSc.

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Praha, 2017

1. Úvod

Atmosférická cirkulace patří mezi hlavní faktory, jež určují klimatické poměry dané lokality, a v mnoha oblastech, včetně mírných zeměpisných šířek, je nejdůležitějším faktorem určujícím proměnlivost přízemních meteorologických prvků v krátkém (mezidenním) časovém měřítku. Veličinami popisujícími atmosférickou cirkulaci budeme pro účely této práce rozumět tlak přepočtený na hladinu moře (dále jen přízemní tlak) nebo geopotenciální výšky standardních tlakových hladin (dále jen výšky) v troposféře (obvykle 1000, 700 nebo 500 hPa), i když atmosférická cirkulace může být popisována i jinými veličinami, jako např. přímo polem rychlosti nebo složek větru či proudovou funkcí.

Způsobů, jak charakterizovat a popsat atmosférickou cirkulaci, je mnoho; předložená práce se soustředí na dva z nich, jež využívají vícerozměrných statistických metod: klasifikace atmosférické cirkulace a tzv. dálkové vazby (z anglického termínu „teleconnections“), nazývané rovněž módy proměnlivosti.

Tato habilitační práce se skládá z 15 prací, publikovaných od roku 2006 do současnosti. Je rozčleněna do čtyř tematických částí, v nichž jsou publikované práce seřazeny chronologicky.

První část se zabývá metodickými aspekty popisu cirkulace pomocí dálkových vazeb, zejména využitím analýzy hlavních složek. Zahrnuje následující práce:

[1] Huth, R., 2006: The effect of various methodological options on the detection of leading modes of sea level pressure variability. *Tellus*, **58A**, 121-130.

[2] Huth, R., 2006: Pacific centre of the Arctic Oscillation: product of high local variability rather than teleconnectivity. *Tellus*, **58A**, 601-604.

[3] Huth, R., 2007: Arctic or North Atlantic Oscillation? Arguments based on the principal component analysis methodology. *Theor. Appl. Climatol.*, **89**, 1-8.

Druhá část se soustředí na metodické aspekty klasifikací jako nástroje popisu atmosférické cirkulace. Patří sem tyto práce:

[4] **Huth, R.**, Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J., Tveito, O.E., 2008: Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Ann. N. York Acad. Sci.*, **1146**, 105-152.

[5] **Huth, R.**, 2010: Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: First results. *Phys. Chem. Earth*, **35**, 388-394.

[6] **Huth, R.**, Beck, C., Kučerová, M., 2016: Synoptic-climatological evaluation of the classifications of atmospheric circulation patterns over Europe. *Int. J. Climatol.*, **36**, 2710-2726.

Třetí část obsahuje práce související s detekcí změn klimatu a modelováním klimatu; tyto práce se zabývají analýzou dlouhodobých změn (trendů) atmosférické cirkulace, jejich souvislostmi s trendy přízemních klimatických proměnných a využitím vícerozměrných statistických metod při interpretaci výstupů klimatických modelů:

[7] Kyselý J., **Huth R.**, 2006: Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theor. Appl. Climatol.*, **85**, 19-36.

[8] Beranová, R., **Huth, R.**, 2008: Time variations of the effects of circulation variability modes on European temperature and precipitation in winter. *Int. J. Climatol.*, **28**, 139-158.

[9] **Huth, R.**, Kliegrová, S., Metelka, L., 2008: Nonlinearity in statistical downscaling: does it bring an improvement for daily temperature in Europe? *Int. J. Climatol.*, **28**, 465-477.

[10] Pokorná, L., **Huth, R.**, 2015: Climate impacts of the NAO are sensitive to how the NAO is defined. *Theor. Appl. Climatol.*, **119**, 639-652.

[11] Kučerová, M., Beck, C., Philipp, A., **Huth, R.**, 2017: Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types in COST733 classifications over Europe. *Int. J. Climatol.*, **37**, 2502-2521.

Čtvrtá část studuje souvislost atmosférické cirkulace s 11-letým cyklem sluneční aktivity:

[12] **Huth, R.**, Pokorná, L., Bochníček, J., Hejda, P., 2006: Solar cycle effects on modes of low-frequency circulation variability. *J. Geophys. Res.*, **111**, D22107.

[13] **Huth, R.**, Bochníček, J., Hejda, P., 2007: The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **69**, 1095-1109.

[14] **Huth, R.**, Kyselý, J., Bochníček, J., Hejda, P., 2008: Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Ann. Geophys.*, **26**, 1999-2004.

[15] **Huth, R.**, Pokorná, L., Bochníček, J., Hejda, P., 2009: Combined solar and QBO effects on the modes of low-frequency atmospheric variability in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **71**, 1471-1483.

Tento soubor 15 publikovaných prací je v každé ze svých čtyř částí doplněn stručným úvodem, jenž klade články do širšího kontextu, a shrnutím nejdůležitějších výsledků. Každá část je zakončena krátkým popisem dalších aktivit, jimiž autor habilitační práce s týmem spolupracovníků a se svými studenty témata publikovaných prací dále rozvíjel, včetně zapojení do mezinárodní spolupráce a výzkumu plánovaného v nejbližší době. Zmíněny jsou rovněž studentské práce (dokončené i probíhající), jež v rámci výzkumu navazujícího na publikované práce vznikly nebo jsou v současnosti zpracovávány.

Články, jež tvoří tuto práci, byly – vedle institucionálního financování prostřednictvím výzkumných záměrů apod. – vypracovány v rámci následujících projektů:

- Nové přístupy k určování klimatických trendů a jejich statistické významnosti. GA ČR, 2016-2018
- Vývoj, validace a implementace metod statistického downscalingu. MŠMT ČR, 2012-2015
- Extraterestrické vlivy na atmosférickou cirkulaci v mírných a vysokých zeměpisných šířkách. GA AV ČR, 2008-2011

- Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions, akce COST733, 2005-2010
- Klasifikace atmosférické cirkulace: inventarizace a využití při výzkumu klimatu. MŠMT ČR, 2005-2010
- Mění se perzistence a časová měřítka atmosférické cirkulace v mírných šířkách nad Evropou? GA AV ČR, 2005-2008
- Atmosférické dálkové vazby nad euro-atlantskou oblastí, GA ČR, 2005-2007
- Vlivy sluneční a geomagnetické aktivity na troposférickou cirkulaci severní polokoule, GA AV ČR, 2004-2007
- Vztah mezi typy atmosférické cirkulace a výskytem povodňových situací, GA ČR, 2003-2004
- Vývoj metod statistického downscalingu pro výzkum dopadů klimatické změny, GA ČR, 2002-2004

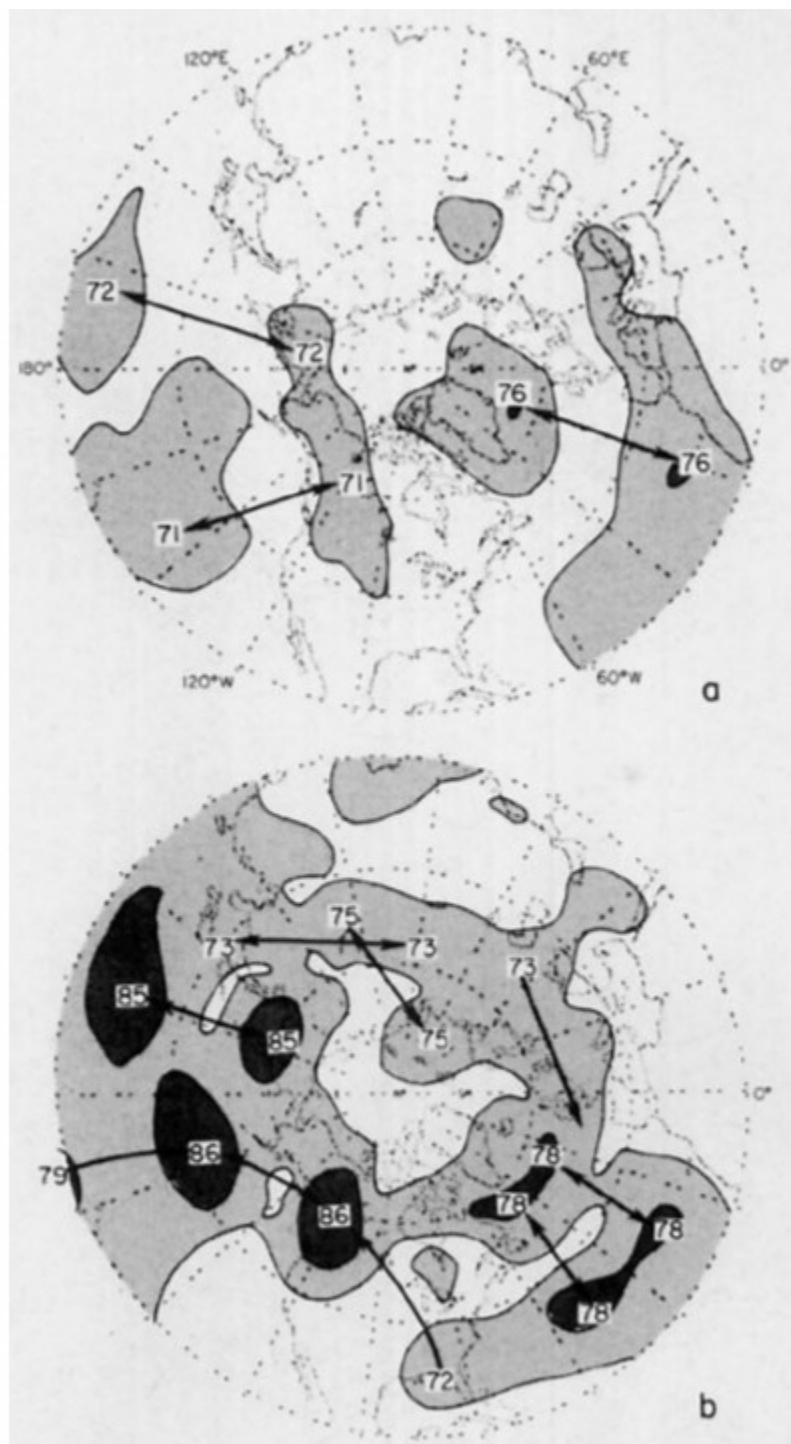
2. Metodické aspekty analýzy dálkových vazeb

Dálkovými vazbami (teleconnections) jsou nazývány dvojice (či trojice, čtveřice atd.) navzájem oddělených (a často geograficky vzdálených) oblastí, mezi nimiž jsou hodnoty přízemního tlaku nebo výšek vysoce korelovány, ať už kladně či záporně. Přestože dálkové vazby lze identifikovat pro jakékoliv časové měřítko, dominantní jsou pro měřítko vnitrosezónní a meziroční (zde jsem se pokusil, možná poněkud neuměle, přeložit běžně užívané anglické termíny “intraseasonal” a “interannual”).

V dalším textu se budu zabývat jen dálkovými vazbami v tomto časovém měřítku, přestože dálkové vazby byly analyzovány i pro kratší, tj. synoptické měřítko (periody cca 2 až 10 dní; Huth 1997a; Kayano 2003). Nejběžnějším postupem, jak izolovat děje v atmosféře v časovém měřítku vnitrosezónním a meziročním, je analyzovat měsíční průměrné hodnoty nebo filtrovat data nízkopásmovým filtrem (viz např. Blackmon 1976). Rovněž tak se omezím na mimotropické oblasti, neboť v blízkosti rovníku je proměnlivost atmosférické cirkulace malá a proudění vzduchu je řízeno více termicky, zejm. prostřednictvím Hadleyovy cirkulační buňky a monzunové cirkulace, než dynamicky (tlakovým gradientem a Coriolisovou silou).

Prvními zjištěnými a popsányi dálkovými vazbami v atmosféře byly Jižní oscilace, úzce související s jevem El Niño, a Severoatlantická oscilace (North Atlantic Oscillation, NAO), jež spočívá v synchronizovaném chování azorské tlakové výše a islandské tlakové níže. Projevy NAO byly známy již v 18. stol., o čemž svědčí deník misionáře Hanse Egede Saabyea z let 1770-1778: “V Grónsku jsou všechny zimy kruté, ale přesto se liší. Dánové si všimli, že když byla zima v Dánsku krutá (...), zima v Grónsku byla svým způsobem mírná, a naopak” (van Loon a Rogers 1978). Ač je NAO asi nejznámější a nejvíce prostudovanou dálkovou vazbou, není zdaleka jedinou.

Pro detekci a popis dálkových vazeb se používají dvě hlavní metody. První z nich vychází z autokorelačních map (viz např. Wallace a Gutzler 1981; Kousky a Bell 1992): pro každý z bodů, v nichž jsou k dispozici data (uzlové body pravidelné sítě, případně stanice), se spočítají korelace se všemi ostatními body, a ty se vynesou do mapy. Výsledná mapa pak ukazuje, nakolik proměnlivost zkoumané veličiny v daném bodě souvisí s její proměnlivostí v jakémkoliv jiném



Obr. 1. Nejsilnější záporná korelace (telekonektivita; $\times 100$) pro přízemní tlak (nahore) a výšku hladiny 500 hPa (dole), pro průměrné měsíční hodnoty v zimě (prosinec až únor) v l. 1962/63 – 1976/77. Stínování označuje hodnoty přesahující 60 a 75. Převzato z Wallace a Gutzler (1981).

bodě. Takových map zkonstruujeme tolik, kolik je bodů. To je však dost nepřehledné; výslednou informaci, jež je obsažena ve značném množství map, je tedy vhodné dále agregovat. Proto se

zavádí tzv. telekonektivita (anglicky teleconnectivity; lze přeložit třeba jako „dálková vazebnost“): každému bodu je přiřazena hodnota nejvíce záporné korelace mezi ním a jakýmkoliv jiným bodem. Po vynesení do mapy se dálkové vazby objeví jako oblasti s vysokou telekonektivitou, jež jsou vzájemně silně korelovány. Příklad takové analýzy pro severní polokouli je na Obr. 1.

Detekce dálkových vazeb na autokorelačních mapách a na mapách dálkové vazebnosti je sice přímočará, ale poněkud neohrabaná a hlavně nejednoznačná. Ne všechny dálkové vazby se v poli dálkové vazebnosti objeví jako dvojice (či n-tice) oblastí s vysokými hodnotami této veličiny. Proto se postupně jako hlavní nástroj detekce dálkových vazeb prosadila analýza hlavních složek (principal component analysis, PCA; např. Horel 1981; Barnston a Livezey 1987).

PCA je lineární vícerozměrná statistická metoda, jež transformuje původní soubor proměnných do nového souboru proměnných, nazývaných hlavní složky. Její podstatou je výpočet vlastních čísel a vektorů pro matici podobnosti vstupních dat. Mírou podobnosti je obvykle kovariance nebo korelace, ale PCA je možno založit i na kongruenci (kongruenci se často nazývá necentrovaná korelace – viz např. Richman a Lamb 1985) nebo vhodně transformované Euklidovské vzdálenosti (Elmore a Richman 2001). Hlavní složky mají dvě základní vlastnosti: (i) jsou navzájem ortogonální (tj. nekorelované či lineárně nezávislé) a (ii) postupně maximalizují vysvětlený rozptyl, tj. první hlavní složka vysvětluje maximum rozptylu, druhá hlavní složka vysvětluje maximum rozptylu nevysvětleného první složkou, třetí hlavní složka vysvětluje maximum rozptylu nevysvětleného prvními dvěma složkami, atd. Důsledkem je, že většina rozptylu (tj. signálu) se obvykle soustředí do malého počtu složek, a data je tak možno velmi dobře aproximovat daleko menším počtem proměnných, než kolika byla popsána původní data. PCA se tedy s výhodou používá pro redukci počtu proměnných a ortogonalizaci dat.

Každá hlavní složka je charakterizována třemi aspekty: (i) vlastním číslem matice podobnosti, jež kvantifikuje rozptyl vysvětlený hlavní složkou, (ii) komponentní vahou (anglicky „loading“), což je (většinou normovaný) vlastní vektor představující korelaci či kovarianci mezi hlavní složkou a původními proměnnými a (iii) skóre (amplitudou), jež kvantifikuje, nakolik je daná hlavní složka zastoupena v každém z členů analyzovaného souboru. V konfiguraci datové matice, jež se používá pro detekci módů proměnlivosti, tj. sloupce odpovídají bodům pravidelné sítě (příp.

stanicím) a řádky odpovídají časovým realizacím, např. měsícům (tato konfigurace se obvykle nazývá S-mód, viz např. Richman 1986), tvoří komponentní váhy mapu, zatímco skóre tvoří časovou řadu. Je třeba podotknout, že názvosloví v rámci PCA je nejednotné; jak pro váhy, tak pro skóre se běžně používají i jiné termíny. Nejednotný je ostatně i název samotné metody: protože byla odděleně vyvinuta v různých vědních oborech, je známa pod různými názvy, z nichž ve vědách o atmosféře je hojně používán termín „analýza empirických ortogonálních funkcí.“

U hlavních složek, jejichž vlastní čísla jsou si navzájem blízká, může docházet k jejich vzájemnému mísení, jež je v tomto kontextu obvykle nazýváno „degenerací“ (North a kol. 1982): signál degenerovaných hlavních složek může být náhodně promíchán a jejich interpretace může v takovém případě být zavádějící. Možným řešením je tzv. rotace hlavních složek (Richman 1986): rotací se rozumí lineární transformace hlavních složek s cílem se co nejvíce přiblížit tzv. „jednoduché struktuře“, jež je charakterizována komponentními vahami blížícími se (po normalizaci vlastním číslem) nule nebo plus/minus jedné. Důvod spočívá v tom, že hodnoty vah vzdálené od nuly a plus/minus jedné jsou možným projevem mísení hlavních složek. Nevyhnutelným důsledkem rotace je, že rotované hlavní složky jsou připraveny o základní vlastnosti hlavních složek: nemaximalizují rozptyl (u kolmých rotací) a navíc ztrácejí ortogonalitu (u šikmých rotací).

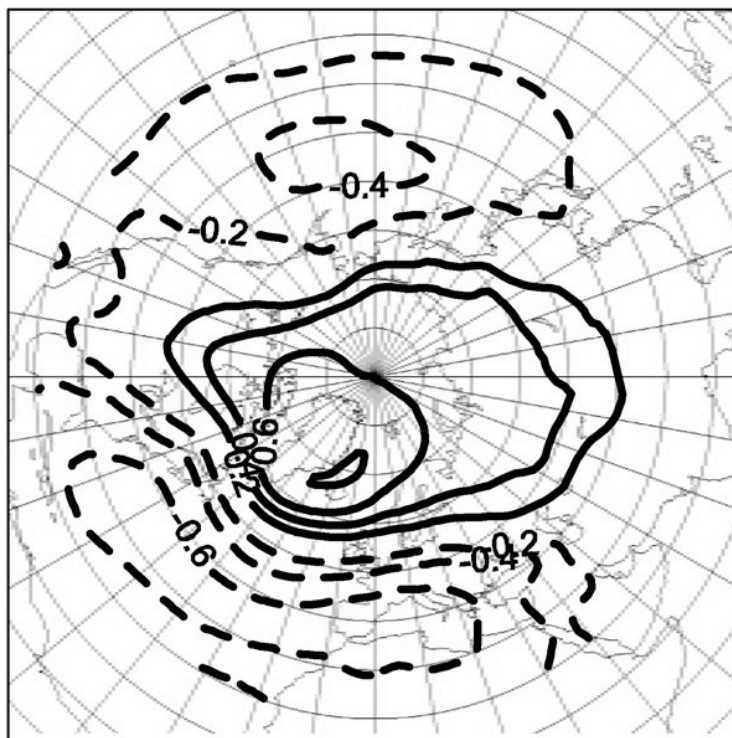
Zda daná hlavní složka odpovídá nějakému reálnému procesu, lze zjistit porovnáním mapy jejích komponentních vah s autokorelačními (či autokovariančními) mapami. Autokorelační / autokovarianční mapy totiž představují právě tu strukturu dat, již mají hlavní složky odhalit a co nejlépe popsat. Mnoho studií již prokázalo (Richman a Lamb 1985; Compagnucci a Richman 2008; Lian a Chen 2012), že nerotované hlavní složky se velmi často nedají interpretovat a že často jsou více umělými artefakty než odrazem reálných procesů.

Analýza hlavních složek vyžaduje, aby uživatel před jejím spuštěním zvolil její parametry. Mezi tyto parametry patří volba matice podobnosti (korelace nebo kovariance?), volba rotace (rotovat hlavní složky?; pokud ano, tak jakou metodou?) a volba počtu hlavních složek, jež jsou podrobeny rotaci a interpretovány, tj. určení hranice mezi signálem a šumem: rotujeme-li příliš málo hlavních složek, přijdeme o část signálu; rotujeme-li jich příliš mnoho, jednak

kontaminujeme výsledky šumem, jednak se dálkové vazby nežádoucím způsobem rozpadají na jednotlivá izolovaná centra (O'Lenic a Livezey 1988). Ilustrací takto „přerotované“ analýzy hlavních složek, jejímž výsledkem nejsou dálkové vazby, ale jen oddělená jednotlivá centra, může být práce Vejmelka a kol. (2015). Další nutné volby předcházející vlastní analýze se týkají úpravy vstupních dat, zejm. jejich normalizace [vstupují do analýzy „surová“ data, odchylky od dlouhodobého průměru (jakého – celoročního, sezónního, měsíčního...?), nebo standardizovaná data?], prostorové rozlišení dat (hustota sítě) a způsob kompenzace nerovnoměrného prostorového rozložení uzlových bodů, neboť plocha odpovídající uzlovému bodu v pravidelné zeměpisné síti se od rovníku k pólům zmenšuje. Volba všech těchto parametrů může ovlivnit výsledky PCA.

Práce [1] se zabývá právě analýzou toho, jak jednotlivé parametry ovlivňují výsledky detekce módů proměnlivosti pomocí PCA, na příkladu pole měsíčních průměrů přízemního tlaku v mimotropické části severní polokoule (severně od 20° s.š. včetně). Její výsledky ukazují, že různé způsoby kompenzace nerovnoměrného rozložení uzlových bodů (vážení kosinem zeměpisné šířky a redukováná síť) vedou k téměř stejným výsledkům. Ignorování nerovnoměrného rozložení uzlových bodů může výsledky značně ovlivnit, a to až do té míry, že jsou detekovány zcela jiné módy; odlišnosti jsou přitom větší pro nerotované než pro rotované složky. Vliv hustoty sítě je velmi malý. Značný je naopak vliv volby matice podobnosti na nerotované hlavní složky; její vliv na rotované složky je poměrně malý. Nejpodstatnější je jednoznačné potvrzení toho, že rotované hlavní složky daleko lépe odpovídají autokorelační struktuře přítomné v datech, a jsou tedy podstatně vhodnější pro interpretaci výsledků, než nerotované hlavní složky.

Poslední uvedený výsledek má významné implikace pro posouzení věrohodnosti (či spíše pro zpochybnění) existence tzv. arktické oscilace (AO). Tu definovali Thompson a Wallace (1998) jako první nerotovanou hlavní složku v poli tlaku v severních mimotropických oblastech. AO sestává ze tří center, z nichž jedno se rozkládá nad Arktidou, další dvě opačného znaménka pak leží ve středních zeměpisných šířkách: nad Atlantikem v oblasti azorské tlakové výše a nad Pacifikem v oblasti aleutské tlakové níže (Obr. 2). Reálnost existence AO byla zpochybněna na základě různých argumentů: Itoh (2002) ukázal její nestabilitu při změně oblasti, na níž je PCA



Obr. 2. Arktická oscilace: Normalizované komponentní váhy (tj. korelace anomálií měsíčních průměrů přízemního tlaku se skóre první nerotované hlavní složky). Výpočet proveden pro prodlouženou zimu (prosinec až březen) v l. 1949/50 – 1999/2000. Interval izochar je 0,2, záporné izočáry jsou čárkované, nulová izočára je vynechána. Převzato z [13].

aplikována, Ambaum a kol. (2001) poukázali na nekonzistenci její definice v polích různých veličin v troposféře a Deser (2000) zjistila absenci korelací mezi pacifickým a atlantickým centrem.

Práce [2] se soustředí na pacifické centrum coby nejslabší článek AO. Srovnání map komponentních vah pro první hlavní složku korelační a kovarianční matice (zobrazující AO) s autokorelačními mapami pro pacifické centrum AO a s prostorovým rozložením směrodatné odchylky přízemního tlaku, jež má v oblasti pacifického centra AO výrazné maximum, ukazuje na to, že pacifické centrum AO je výsledkem vysoké lokální proměnlivosti tlaku, nikoliv však jeho korelací s dalšími centry AO. Tento závěr je potvrzen i analýzou jednoduchého statistického modelu, napodobujícího AO: komponentní váhy módu podobného AO velmi silně závisí na velikosti lokální proměnlivosti v pacifickém centru, přestože korelace s oběma dalšími centry se nemění. Toto chování je nežádoucí, neboť takový mód vůbec nepopisuje dálkové vazby.

Ověření reálnosti AO na základě argumentů vycházejících z PCA je náplní práce [3]. Kritérii jsou (i) přítomnost jednoduché struktury v komponentních vahách, (ii) podobnost map komponentních vah s autokorelačními mapami a (iii) stabilita vůči oblasti, na níž je PCA počítána. Všechna tři kritéria upřednostňují rotované hlavní složky před nerotovanými; proto je třeba proměnlivost atmosférické cirkulace v oblasti severního Atlantiku interpretovat prostřednictvím NAO, nikoliv AO. AO vychází i z této analýzy jako statistický artefakt, nikoliv reálný mód proměnlivosti.

Četné studie, včetně těch, jež jsou zařazeny do této práce, jednoznačně ukazují, že pro popis módů proměnlivosti je třeba vycházet z rotované PCA, že nerotovaná PCA není pro popis módů proměnlivosti vhodná a že AO není reálný mód proměnlivosti. AO se přesto nadále hojně používá v mnoha studiích troposférické cirkulace. Nedostatečně poučení autoři nerotované hlavní složky znovu a znovu nekriticky interpretují, ignorujíce dosavadní poznatky o nevhodnosti nerotované PCA, a to samozřejmě s pochybnými výsledky (viz např. Kohyama a Hartmann 2016). Jedním konkrétním příkladem je domnělá detekce nereálných módů v teplotě povrchu moře (např. Ashok a kol. 2007; Zhang a kol. 2010), již pomocí podrobné analýzy, včetně syntetických dat, zpochybnili Lian a Chen (2012). Druhým příkladem je tzv. Barentsova oscilace (BO), definovaná jako druhá či třetí nerotovaná hlavní složka pole tlaku nad severním Atlantikem a Evropou, tvořící dipól s centry nad Barentsovým mořem a západní částí severního Atlantiku. Pojem BO zavedl Skeie (2000), a přestože Tremblay (2001) její reálnou existenci vyvrátil, Chen a kol. (2013) s ní dále pracují, aniž by se s Tremblayovými argumenty i obecnými argumenty proti interpretaci nerotovaných hlavních složek jakkoliv vypořádali. Stejně tak mnoho jiných autorů dále pracuje s pojmem AO, nepochybující o její reálné existenci (zde by byl seznam literatury obzvlášť dlouhý...).

Výzkum v oblasti detekce módů proměnlivosti je tedy stále živý, přičemž se samozřejmě nejedná jen o vyvracení vytrvale opakovaných omylů. Nicméně opětovné ověření vhodnosti nerotované PCA pro detekci módů proměnlivosti na základě kritérií shody s autokorelačními strukturami a prostorové a časové stability se jeví jako stále aktuální úkol, a proto je i jednou ze součástí probíhajícího projektu „Dálkové vazby – hlavní stavební kameny atmosférické cirkulace“, financovaného GA ČR, jehož je autor této práce řešitelem. Hlavní myšlenkou této

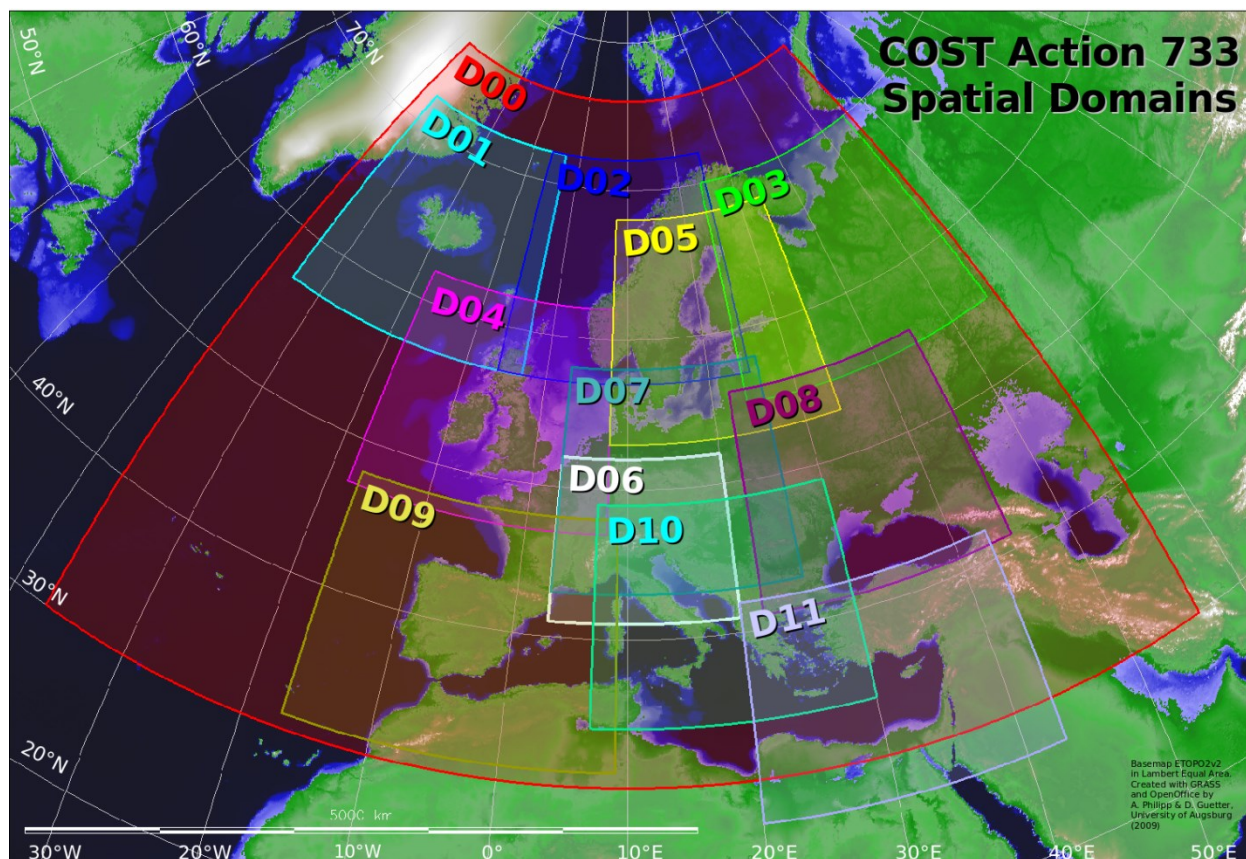
části projektu je srovnání chování NAO jakožto módu definovaného pomocí rotované PCA, jenž je reálný a fyzikálně nezpochybnitelný, s chováním AO a BO coby módů nereálných, a opětovné zdůraznění podmínek, za nichž je interpretace hlavních složek jako módů proměnlivosti vůbec možná. Dalším úkolem tohoto projektu, jenž se týká metodických aspektů detekce a popisu módů proměnlivosti, je srovnání jejich běžné definice pomocí rotované PCA s jejich interpretací jako kontinua polí atmosférické cirkulace, jež je popisováno pomocí klasifikace metodou samo-organizujících map (např. Johnson a kol. 2008; Chang and Johnson 2015; Yuan a kol. 2015; samo-organizující mapy jsou poněkud podrobněji diskutovány v další kapitole), jež je dle autorova názoru přinejmenším zavádějící, ne-li chybná.

3. Metodické aspekty klasifikací atmosférické cirkulace

Klasifikace polí atmosférické cirkulace (obvykle tlaku, příp. i výšek standardních tlakových hladin) je dalším široce užívaným postupem, jak atmosférickou cirkulaci popsat. Podstatou klasifikace je nalezení malého počtu charakteristických (typických) polí, k nimž jsou konkrétní jednotlivá pole atmosférické cirkulace (většinou okamžitá, tj. v konkrétních termínech, případně průměry za den či delší časová období) přiřazena. Každé jednotlivé pole je přiřazeno k právě jednomu typu, s výjimkou tzv. fuzzy klasifikací (viz např. Bárdossy a kol. 2002), v nichž jedno pole může být – s rozdílnou mírou příslušnosti – přiřazeno více typům, a klasifikací, které umožňují část polí (obvykle velmi malou) nechat neklasifikovanou (např. klasifikace založená na korelacích; Lund 1963). Výhodou popisu cirkulace pomocí klasifikace je, že umožňuje nepřehledně velký počet (vlastně kontinuum) reálně se vyskytujících polí zjednodušit na poměrně malý počet cirkulačních typů, a to na úkor přesnosti popisu jednotlivých polí: čím méně typů, tím jednodušší a přehlednější, avšak méně přesný (tj. více zjednodušující) popis.

Klasifikace atmosférické cirkulace jsou již dlouhá léta důležitým předmětem klimatologického výzkumu (např. Lund 1963; Paegle a Kierulff 1974; Yarnal 1985; Kidson 1994) a stále jím zůstávají (např. Bettolli a Peňalba 2014; Broderick a Fealy 2015; Horton a kol. 2015; Engelbrecht a Landman 2016; Gibson a kol. 2016; Jiang a kol. 2017; Nilsen a kol. 2017), přičemž – jak tento víceméně náhodný výběr odkazů ukazuje – jejich využití je celosvětové. To se odrazilo v mezinárodním projektu řešeném v rámci evropské spolupráce ve vědě a technologiích (European Cooperation in Science and Technology – COST) COST733 „Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions“. Tento projekt (v terminologii COSTu označovaný jako „akce“) byl řešen v l. 2005-2010 za účasti odborníků z 23 evropských zemí (viz http://www.cost.eu/COST_Actions/essem/733). Jeho hlavními výsledky byly rozsáhlá databáze klasifikací atmosférické cirkulace pro 12 oblastí v Evropě (viz Obr. 3), software určený pro klasifikaci polí atmosférické cirkulace, srovnání klasifikačních metod a jejich atributů a aplikace klasifikací v širokém spektru meteorologických, klimatologických a environmentálních problémů (více viz Huth a kol. 2010; Tveito a Huth 2016).

Jedním z hlavních výstupů akce COST733 je přehledový článek [4], jenž shrnuje dosavadní poznatky o klasifikacích v klimatologii, s důrazem na klasifikace atmosférické cirkulace. V jeho úvodu je mj. zdůrazněn rozdíl mezi pojmy klasifikační metoda [algoritmus, pomocí něhož jsou hledány cirkulační typy, a jednotlivá „pole“ či „mapy“ (slovo „pattern“, jež je v tomto kontextu v angličtině běžně používáno, nemá v češtině odpovídající ekvivalent)] jsou pak k těmto typům přiřazovány] a klasifikace (proces třídění a rovněž jeho konkrétní výsledek); pomocí jedné klasifikační metody tedy může být vytvořeno mnoho různých klasifikací. Podstatnou částí práce (kap.2) je systematizace klasifikačních metod, včetně sjednocení jejich názvosloví, a shrnutí metodických postupů používaných ke klasifikaci, včetně identifikace jejich silných a slabých stránek. Prostor v článku je věnován i vysvětlení rozdílů mezi klasifikací a analýzou pomocí PCA, tj. analýzou módů proměnlivosti. V článku jsou dále popsány hlavní směry vývoje klasifikací



Obr. 3. Oblasti, pro něž byly vytvořeny klasifikace atmosférické cirkulace v projektu COST733 (<http://cost733.geo.uni-augsburg.de/cost733wiki/Cost733Domains>).

atmosférické cirkulace v počátku 21. století (kap.3): zavádění nelineárních metod, objektivizace subjektivních klasifikací, snižování proměnlivosti uvnitř typů, vylepšování shlukovacích algoritmů a vývoj metod pro určení optimálního počtu typů. Jako jedna z hlavních tendencí byla identifikována rostoucí rozmanitost klasifikačních metod, jež si vyžaduje koordinovaný postup k jejich srovnání; tento závěr ostatně byl hlavní motivací celé akce COST733. Práce [4] shrnula i aplikace klasifikací, jež se v době jejího vydání rozvíjely (kap. 4): jejich rostoucí použití ve studiích změny klimatu (a obecněji při interpretaci výstupů z klimatických modelů), možné využití při interpretaci ensemblové předpovědi počasí, rostoucí rozmanitost klimatologických a environmentálních studií, jež klasifikací využívají, a použití klasifikací při analýze procesů ve vyšších vrstvách atmosféry (zejm. ve stratosféře). Součástí práce [4] je i shrnutí výsledků „inventarizace“ klasifikačních postupů a klasifikací používaných v Evropě, jež byla uskutečněna pomocí dotazníkového šetření (kap.5). Tato inventarizace posloužila jako základ pro výběr klasifikačních metod a klasifikací, jimiž se akce COST733 dále zabývala. Kapitola 6 shrnuje dosavadní poznatky o srovnávání a hodnocení klasifikací. Práci [4] uzavírají konkrétní příklady využití klasifikací v různých klimatologických aplikacích (kap.7).

Klasifikace a klasifikační metody byly v akci COST733 hodnoceny z různých pohledů a podle rozmanitých kritérií. Jedním z nich je tzv. synopticko-klimatologická použitelnost; ta je definována jako schopnost dané klasifikace odlišit statistická rozdělení přízemních klimatických prvků podmíněná jednotlivými cirkulačními typy. Z pohledu synoptické klimatologie, jakožto nauky o vlivech atmosférické cirkulace na přízemní klimatické poměry, se jedná o vlastnost zásadní.

Synopticko-klimatologickou použitelností klasifikací se zabývají práce [5] a [6]. Studie [5] je předběžnou analýzou pro poměrně omezený soubor klasifikací z počáteční fáze akce COST733. Synopticko-klimatologická použitelnost dané klasifikace pro danou veličinu (zde denní minimální a maximální teplota) v daném místě je kvantifikována pomocí Kolmogorovova-Smirnovova (K-S) testu shody mezi empirickým rozdělením klimatického prvku (teploty) pro daný cirkulační typ a pro všechny ostatní typy dohromady. Pro čím více typů je detekován statisticky významný rozdíl mezi těmito dvěma empirickými rozděleními, tím lepší je synopticko-klimatologická použitelnost dané klasifikace. Ukázalo se, že tato použitelnost závisí velmi silně

na počtu cirkulačních typů. Pro srovnání různých klasifikačních metod je proto nutné vytvořit klasifikace s přibližně stejným počtem typů. Tento závěr byl pro další směřování akce COST733 velmi důležitý: na jeho základě bylo rozhodnuto, že všechny klasifikace, u nichž je to možné, budou vytvořeny s třemi různými předem danými počty typů: 9, 18 a 27.

Databáze klasifikačních metod a další metodické detaily týkající se konstrukce (výpočtu) klasifikací v akci COST733 jsou popsány v pracích Philipp a kol. (2010) a Philipp a kol. (2016). Práce [6] analyzuje synopticko-klimatologickou použitelnost klasifikací ze souboru vytvořeného v akci COST733, jenž čítal 423 různých klasifikací pro každou z 12 oblastí (Philipp a kol. 2016). Pomocí tří kritérií (vysvětlený rozptyl, pseudo-F statistika a statistika založená na počtech úspěšných detekcí rozdílů pomocí K-S testu zavedená v [5]) a vhodné agregace výsledků jsou vyhodnoceny vlivy různých parametrů klasifikací na synopticko-klimatologickou použitelnost. Tyto parametry zahrnují počet typů, počet náraz klasifikovaných dní (každý den jednotlivě nebo čtyřdenní sekvence), výběr klasifikovaných proměnných (jen přízemní tlak, nebo přízemní tlak kombinovaný s výškou hladiny 500 hPa, tloušťkou vrstvy 1000/500 hPa nebo vorticitou v hladině 500 hPa) a sezonalitu definice klasifikací (tj. zda je vytvořena jedna klasifikace pro celý rok, nebo čtyři různé klasifikace pro jednotlivá klimatologická roční období). Práce [6] rovněž porovnává klasifikační metody mezi sebou. Ukazuje se, že žádná z metod není univerzálně optimální, nicméně některé metody produkují klasifikace, které úžeji souvisí s přízemními klimatickými proměnnými, než jiné metody. Jako nejvhodnější z pohledu souvislosti s přízemními klimatickými proměnnými se jeví klasifikace založené na shlukové analýze, Litynského metoda a metoda založená na míře shody s předem definovanými tzv. cirkulačními prototypy. Naopak metody vycházející z analýzy hlavních složek a metody využívající tzv. vedoucího algoritmu (leader algorithm; Lundova a Kirchhofferova metoda) jsou pro synopticko-klimatologické analýzy nejméně vhodné. Synopticko-klimatologická použitelnost široce používané klasifikace podle Hesse a Brezowského byla zpracována v bakalářské práci Sýkorová (2013), vedené autorem.

Pokračování výzkumu v oblasti metodiky klasifikací se v nejbližší době soustředí na chování tzv. samo-organizujících map (Self-Organizing Maps; SOMs; Reusch 2010; Sheridan a Lee 2011), jejichž výstupem jsou typy organizované do obdélníkových struktur (polí). SOMs jako klasifikační

metoda vycházejí z umělé inteligence; v atmosférických vědách jsou v poslední době poměrně hojně používány (např. Cassano a kol. 2006; Schuenemann a kol. 2009; Horton a kol. 2015), nicméně jejich vlastnosti a chování zatím nejsou dostatečně popsány a prozkoumány. Jednou nejasností, na niž se chceme v rámci řešení již zmíněného projektu „Dálkové vazby – hlavní stavební kameny atmosférické cirkulace“ soustředit, je vztah SOMs k módům proměnlivosti, zmíněný už výše. Reusch a kol. (2007) uvádějí, že dva nejsilnější módy proměnlivosti se promítají do hlavních diagonál pole, do něhož jsou typy uspořádány; není však jasné, zda je tomu tak vždy a nakolik jsou SOMs schopny zachytit příspěvek dalších módů proměnlivosti. Další otázkou, již se chystáme v blízké době zodpovědět, je, nakolik jsou jednotlivé klasifikační metody schopny replikovat známou strukturu dat. Této analýze, jež by podstatně rozšířila dříve poznatky o chování několika málo klasifikačních metod (Huth 1993; Huth 1996a), podrobíme všechny objektivní klasifikační metody, jež jsou dostupné v klasifikačním softwaru vyvinutém v akci COST 733.

4. Klimatologická analýza atmosférické cirkulace

Jedním z důležitých směrů výzkumu probíhající změny klimatu je analýza změn atmosférické cirkulace, jež je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících chování přízemních klimatických prvků. K analýzám dlouhodobých změn (trendů) cirkulace lze použít různé aspekty nebo způsoby popisu cirkulace, jako např. cyklóny (např. Gulev a kol. 2001; Rudeva a Simmonds 2015), dráhy cyklonálních poruch (tzv. storm-tracks; např. Graham a Diaz 2001; Gulev a kol. 2002) nebo blokující anticyklóny (Wiedenmann a kol. 2002; Barriopedro a kol. 2006). Tato práce se soustředí na popis změn atmosférické cirkulace pomocí módů proměnlivosti a cirkulačních typů.

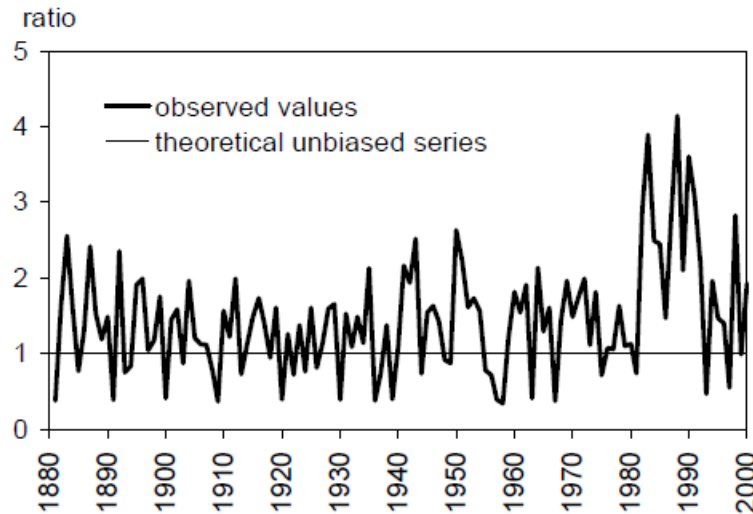
U módů proměnlivosti (dálkových vazeb) se zkoumají změny jejich intenzity v čase; pokud jsou definovány pomocí PCA, analýza trendů se aplikuje na jejich amplitudy (skóre). V nedávné době byla ve středu pozornosti NAO, resp. AO – tyto módy v zimě a na jaře vykazovaly do 90. let 20. stol. výrazné kladné trendy (Hurrell a van Loon 1997; Malberg a Bökens 1997; Zhou a kol. 2001; Feldstein 2002; Ostermeier a Wallace 2003), tedy tendenci k zesilování tlakového gradientu v severním Atlantiku, tudíž k silnějšímu zonálnímu proudění. Některé práce spekovaly o možné souvislosti těchto trendů s postupující antropogenní změnou klimatu (viz např. Fyfe a kol. 1999; Hu a Wu 2004); zastavení a změna znaménka trendů počátkem 21. stol. však tyto spekulace ukončily (např. Cohen a Barlow 2005). Možná souvislost mezi zesilujícím skleníkovým efektem a trendy NAO a AO byla popřena i studiemi využívajícími klimatické modely (např. Osborn 2004; Selten a kol. 2004; Kuzmina a kol. 2005). I další módy na severní polokouli byly podrobeny analýze trendů, byť jim byla věnována daleko menší pozornost než NAO a AO (např. Krichak a Alpert 2005; Smoliak a Wallace 2015).

Studie dlouhodobých změn cirkulace založené na klasifikacích cirkulačních polí se soustředí na dva aspekty cirkulačních typů: četnost a průměrnou perzistenci (dobu trvání). Mnoho studií tohoto druhu využívalo subjektivní klasifikace, zejm. klasifikaci Hesse-Brezowského (H-B), jejíž výhodou je velmi dlouhá časová řada, začínající rokem 1881. H-B klasifikace popisuje atmosférickou cirkulaci nad střední Evropou s důrazem na Německo, nicméně je využitelná v daleko širším prostoru zasahujícím od západní až do východní Evropy. Její detailnější popis lze najít např. v Gerstengarbe a kol. (1999). Před vytvořením reanalýz pro 20. století (20th Century Reanalysis, 20CR, Compo a kol. 2011; ECMWF Twentieth Century Reanalysis, ERA-20C, Poli a

kol. 2016) byla H-B klasifikace prakticky jediným spolehlivým zdrojem informací o atmosférické cirkulaci zasahujícím tak daleko do minulosti. Několik studií s jejím využitím ukázalo, že ve 2. polovině 20. století se v Evropě v zimě zvyšovala četnost typů s převládajícím západním prouděním na úkor typů se severní složkou proudění (Bárdossy a Caspary 1990; Werner a kol. 2000; Kyselý a Domonkos 2006). Analogické výsledky dostali Stefanicki a kol. (1998) pro švýcarskou, rovněž subjektivní, Schüeppovu klasifikaci. Werner a kol. (2000) a Kyselý a Domonkos (2006) zjistili, že průměrná doba trvání typů v H-B klasifikaci se ve 2. polovině 20. století prodlužovala.

Srovnáním dlouhodobých změn cirkulace mezi subjektivními a objektivními metodami popisu cirkulace se zabývá práce [7]. Cirkulace je v této práci popsána třemi způsoby: (i) módy proměnlivosti, určenými pomocí rotované PCA; (ii) subjektivní H-B klasifikací a (iii) objektivní klasifikací založenou na šikmo rotované PCA v T-módu [kde sloupce vstupní datové matice odpovídají časovým realizacím (dnům) a řádky odpovídají uzlovým bodům; viz např. Huth (1996b)] následované nehierarchickou shlukovou analýzou pomocí metody k-means (Huth 2001). Všechny metody potvrdily zesilování zonální cirkulace ve 2. polovině 20. století nad střední Evropou v zimě. Shoda v hrubých rysech mezi metodami byla nalezena i pro nárůst perzistence cirkulace. Rozdíly mezi metodami byly připsány na vrub odlišné metodiky.

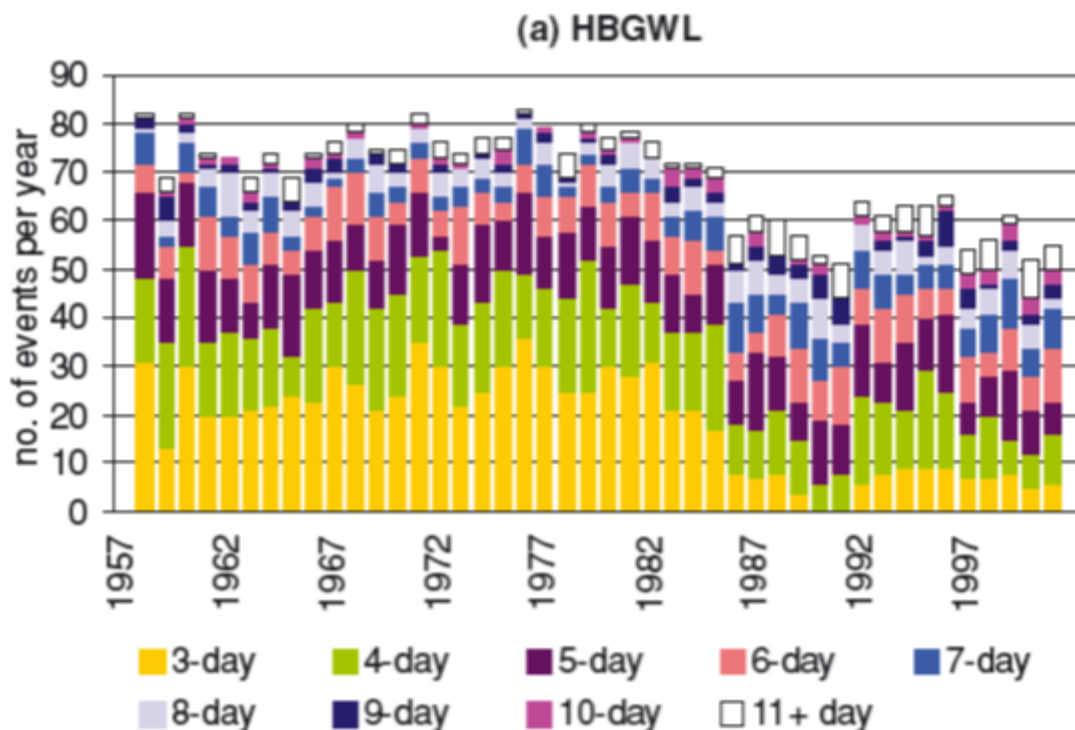
Rozdíly mezi metodami se však později ukázaly jako zásadní. Cahynová a Huth (2007) a Cahynová a Huth (2009) poukázali na dva problémy H-B klasifikace: nerealisticky četné změny typů na rozhraní měsíců (Obr. 4) a téměř úplné vymizení nejkratších možných (3 dny trvajících) situací po roce 1985 (Obr. 5). Jedná se o důsledky nesprávné metodiky, resp. změn metodiky přiřazování jednotlivých dní k typům, jež vedou k nehomogenitě časové řady typů a k nereálným trendům jejich perzistence. Cahynová a Huth (2009) nenašli pro náhlý nárůst perzistence v H-B klasifikaci, spojený s vymizením 3-denních situací, oporu v žádné jiné subjektivní ani objektivní klasifikaci; trendy doby trvání H-B typů jsou proto téměř jistě artefaktem dané klasifikace, nikoliv reálným projevem chování atmosférické cirkulace.



Obr. 4. Podíl mezi relativní četností změny cirkulačního typu na konci měsíce a relativní četností změny cirkulačního typu pro všechny ostatní dny pro Hess-Brezowského klasifikaci v jednotlivých letech 1881-2000. Dlouhodobý průměr je 1,46. Převzato z práce Cahynová a Huth (2007).

Podrobnější náhled do dlouhodobého chování cirkulačních typů přináší práce [11], jež analyzuje změny četnosti a průměrné doby trvání velkého počtu klasifikací z akce COST733 ve všech 12 evropských oblastech. Statisticky významné trendy četností typů jsou, s několika výjimkami, nejhojnější v zimě. V zimě a na jaře jsou tyto trendy konzistentní se zesilováním NAO a jeho posunem na východ (Jung a kol. 2003; Beranová a Huth 2007). Statisticky významných trendů doby trvání typů je poměrně málo a netvoří, s výjimkou posunu převládající dráhy cyklón k severozápadu, konzistentní obraz. Výsledky jednoznačně potvrzují, že trendy zjištěné v H-B klasifikaci jsou důsledkem nehomogenit a nikoliv odrazem reality. Práce [11] je uzavřena dvěma obecnými doporučeními: při analýzách dlouhodobých změn atmosférické cirkulace se jednak vyhýbat subjektivním klasifikacím, neboť mohou být zatíženy neznámými nedostatky a chybami, jež mohou zjištěné trendy velmi dramaticky ovlivnit; jednak využívat větší množství různých klasifikací, neboť jen tak se dají eliminovat vlivy specifických klasifikačních postupů, jež se při použití jediné klasifikace (či klasifikační metody) nedají odlišit od reálného klimatického signálu.

Módy proměnlivosti jsou jedním z hlavních faktorů ovlivňujících lokální klimatické poměry. Mnoho prací se zabývalo vlivem módů proměnlivosti na teplotu, srážky a další přízemní klimatické prvky v různých oblastech světa (viz např. Leathers a kol. 1991; Trigo a kol. 2002;



Obr. 5. Počty situací za rok pro Hess-Brezowského typy podle doby trvání. Převzato z práce Cahynová a Huth (2009).

Jones a kol. 2003; Trigo a kol. 2004; Moore a Renfrew 2012; Liu a kol. 2014). Chen a Hellström (1999) na příkladu vlivu NAO na teplotu ve Švédsku jako jedni z prvních poukázali na fakt, že korelace mezi módy a přízemními klimatickými prvky není v čase stálá; naopak se v čase může velmi významně měnit. Na tuto skutečnost upozornil v poněkud odlišném kontextu už dříve Huth (1997b). Další studie ukazující nestacionaritu vztahů mezi cirkulací a přízemním klimatem následovaly (Jacobeit a kol. 2001; Jones a kol. 2003; Trigo a kol. 2004; Krichak a Alpert 2005). Jung a kol. (2003) se pokusili vysvětlit časovou proměnlivost korelací NAO (zde definované z hodnot tlaku v Lisabonu a na Islandu) s teplotou posunem akčních center NAO (islandské níže a azorské výše): silnější NAO je spojeno s posunem obou tlakových útvarů na východ, což vede k větší těsnosti vztahu mezi NAO a teplotou i srážkami ve velké části Evropy.

Analýzu provedenou Jungem a kol. (2003) jsme rozšířili, a to jak pouze pro NAO prodloužením analyzovaného období na celé 20. století s využitím indexu NAO definovaného staničními daty (Beranová a Huth 2007), tak pro všechny módy proměnlivosti vyskytující se v euro-atlantické

oblasti, definované pomocí PCA [8]. V práci [8] jsme ukázali, že korelace všech módů s přízemní teplotou a srážkami se v čase statisticky významně mění a že tato proměnlivost souvisí se změnou polohy akčních center těchto módů. Při interpretaci výsledků byla využita shluková analýza, jejíž pomocí byly stanice seskupeny podle průběhu korelací mezi módy a teplotou resp. srážkami.

Módy proměnlivosti lze definovat různými způsoby. Jako příklad lze uvést NAO, jehož asi nejběžnější definice je založena na tlaku měřeném na stanicích: index NAO je pak obvykle definován jako normalizovaný rozdíl normalizovaných hodnot tlaku na jedné stanici na Islandu (Akureyri, Stykkisholmur nebo Reykjavík) a jedné stanici v blízkosti centra azorské výše (Ponta Delgada, Lisabon nebo Gibraltar) (Rogers 1984; Hurrell 1995; Jones a kol. 1997; Jones a kol. 2003) – jen samotná kombinace různých stanic nabízí několik možností, jak NAO definovat. Další možností je kvantifikovat NAO ne z tlaku měřeného na stanicích, ale přímo v centrech obou tlakových útvarů (Mächel a kol. 1998; Hameed a Piontkowski 2004); taková definice je výhodná, studujeme-li NAO v reanalýzách nebo výstupech z klimatických modelů, kde staniční data nejsou k dispozici. NAO lze rovněž určit z map dálkových vazeb (např. Wallace a Gutzler 1981; Portis a kol. 2001) a pomocí PCA (např. Barnston a Livezey 1987; Clignet a Martin 1992). Každá z těchto definic vede k jinému projevu NAO v poli tlaku (tj. korelační mapy mezi hodnotami indexu NAO a polem tlaku se pro různé definice NAO liší); dá se tedy očekávat, že se budou lišit i korelace různých indexů NAO s přízemními klimatickými prvky.

První studií, jež se této otázce podrobně věnovala, byla práce [10]. Ta srovnává sedm různých běžně používaných indexů NAO (dva založené na staničních datech, dva na tlaku v centrech tlakových útvarů a tři definované pomocí PCA), a to jak indexy samotné, tak jejich korelace s přízemní teplotou a srážkami v Evropě. Srovnání je provedeno odděleně pro zimu a léto. V létě jsou korelace mezi indexy NAO menší než v zimě; vztah mezi staničními indexy a indexy definovanými pomocí PCA je v létě velmi volný – indexy spolu souvisejí jen okrajově. Citlivost vztahu mezi NAO a přízemními klimatickými prvky na to, jak je NAO definováno, je v létě poměrně značná; korelace indexů NAO s teplotou a srážkami v Evropě se na mnoha místech mezi různými indexy statisticky významně liší; v některých oblastech a pro některé dvojice indexů se korelace liší i ve znaménku. To vše je logickým vyústěním skutečnosti, že se azorská

výše i islandská níže v létě posunují daleko od stanic, na nichž je index NAO rutinně definován (Folland a kol. 2009). Navíc, jak je ukázáno v [10], se centra módu proměnlivosti odpovídajícího NAO v létě oddělují od azorské výše a islandské níže, a tento mód proměnlivosti se tak stává do určité míry na poloze obou tlakových útvarů nezávislým. To vede k interpretaci, že v létě existují dvě různé severoatlantické oscilace, přičemž obě jsou fyzikálně rozumné: jedna charakterizovaná oběma kvazi-permanentními tlakovými útvary, druhá charakterizovaná centry maximální kovariability v poli tlaku. Studii [10] uzavírají dvě obecná doporučení: při analýze atmosférické cirkulace v létě se vyhnout popisu NAO staničními indexy, neboť ty jen velmi málo popisují skutečné chování celého NAO, a při analýzách vlivu atmosférické cirkulace na přízemní klimatické prvky používat současně více indexů NAO, protože nelze určit, který z indexů popisuje NAO nejlépe (samozřejmě s již zmíněnou výjimkou staničních indexů v létě, které jsou nevhodné).

Poslední práce v této části, [9], se věnuje využití klasifikací ve statistickém downscalingu. Úkolem statistického downscalingu je pomocí statistických nástrojů určit hodnoty lokálních přízemních klimatických proměnných z velkoprostorových proměnných ve volné atmosféře (viz např. Huth 2002; Benestad a kol. 2008). Klasifikace představují v tomto kontextu nástroj, jak do vztahů mezi proměnnými velkého měřítka (prediktory) a lokálními proměnnými (prediktandy) vnést nelinearitu. Základní idea využití klasifikací ve statistickém downscalingu je, rozdělit data do několika tříd na základě podobnosti atmosférické cirkulace, a v každé ze tříd vybudovat statistický model (jenž je většinou lineární) odděleně (Cavazos 1997; Enke a Spekat 1997; Li a Sailor 2000; „vybudováním statistického modelu“ zde rozumíme výběr prediktorů a odhad regresních koeficientů). Klasifikace lze přitom ve statistickém downscalingu využít ještě nejméně dvěma dalšími způsoby: každému prvku (tj. každému dnu) v dané třídě přiřadit průměrnou hodnotu pro danou třídu (Saunders a Byrne 1999) nebo četnosti cirkulačních typů vzít přímo jako prediktory měsíčních či sezónních průměrných hodnot přízemních klimatických prvků (Goodess a Jones 2002).

V práci [9] jsou denní hodnoty minimální a maximální teploty na stanicích v Evropě určovány z několika prediktorů velkého měřítka pomocí tří různých metod: lineární regrese, umělých neuronových sítí a lineární regrese aplikované na data roztržiděná podle typů atmosférické

cirkulace. Použito bylo celkem šest různých klasifikací, a to pro 4, 11 a 18 typů určených metodami PCA v T-módu a metodou k-means shlukové analýzy. Ukazuje se, že klasifikace nezlepšuje shodu simulovaných hodnot s realitou oproti lineární regresi aplikované na neklasifikovaná data, ani není schopna reprodukovat ne-gaussovské chování (zejm. asymetrii) rozdělení teploty. Klasifikace nezlepšily ani časovou strukturu specifikovaných teplot (tj. časové autokorelace) a jen málo zlepšily jejich prostorovou strukturu (prostorové autokorelace). Důvodem tohoto chování je, že zhoršení kvality downscalingu vyvolané nutností počítat větší počet parametrů, což vede k větší nejistotě v jejich určení, není dostatečně kompenzováno potenciálním zlepšením díky dosažení pevnějšího (užšího) regresního vztahu v menších datových souborech (tj. v jednotlivých třídách). Využití klasifikací pro rozdělení dat při statistickém downscalingu tak zřejmě představuje spíše slepou uličku než perspektivní směr dalšího vývoje.

Některé z výsledků akce COST733, zmíněné výše, byly součástí dizertační práce Moniky Cahynové (nyní Kučerové), vypracované pod autorovým vedením (Cahynová a Huth 2007; Cahynová a Huth 2009; Cahynová 2010; Cahynová a Huth 2010). Hlavním cílem dizertace bylo zjistit, nakolik jsou dlouhodobé změny (trendy) teploty a srážek v Evropě způsobeny dlouhodobými změnami četností cirkulačních typů: ukázalo se, že souvislost trendů cirkulace s trendy teploty a srážek je poměrně slabá: část trendů teploty (do 50%) lze změnami cirkulace vysvětlit jen v zimě.

Akce COST733 se cíleně nezabývala využitím klasifikací atmosférické cirkulace pro interpretaci výstupů z klimatických modelů. Klasifikace přitom lze s výhodou použít pro validaci klimatických modelů i pro odhady změn cirkulace spojené s budoucí antropogenní změnou klimatu, jak ukázal přehledový článek [4], a dále viz např. Huth (1997a), Huth (2000), Cassano a kol. (2006), Hope (2006), James (2006), McKendry a kol. (2006), Demuzere a kol. (2009) a Pastor a Casado (2012). Touto problematikou se pod autorovým vedením ve své doktorské práci a v projektu „Využití synoptických klasifikací v interpretaci výstupů z klimatických modelů“ financovaném GA UK zabývá Jan Stryhal: po shrnutí problematiky klasifikací atmosférické cirkulace, včetně jejich využití při interpretaci výstupů z klimatických modelů (Stryhal a Huth 2016) vyhodnotil schopnost globálních klimatických modelů simulovat atmosférickou cirkulaci v několika

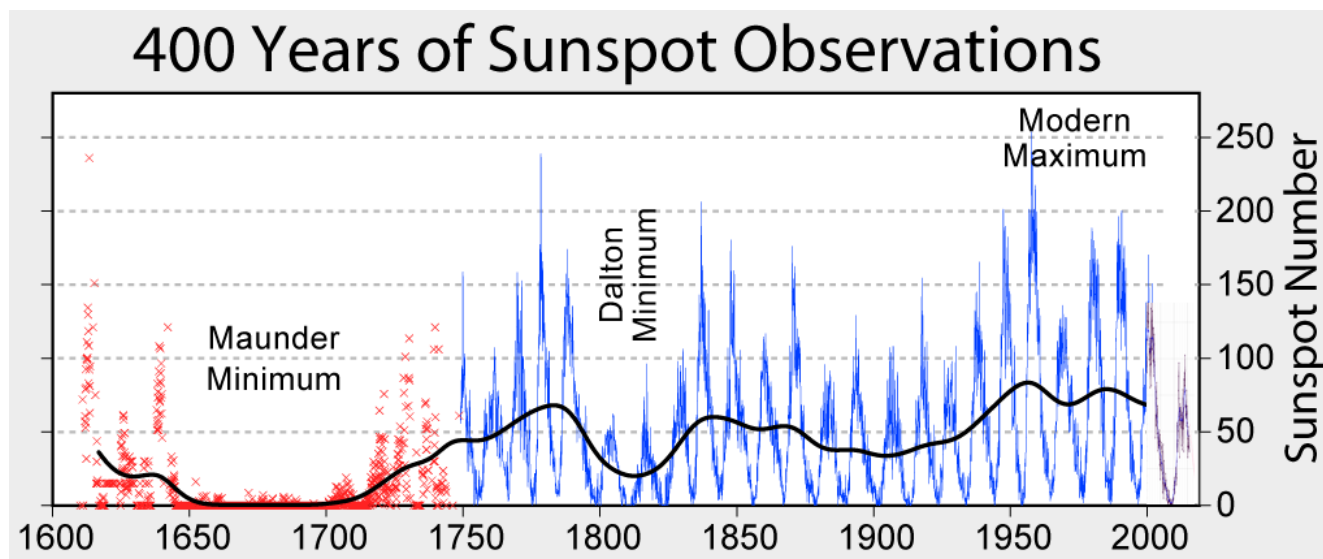
evropských oblastech pro větší počet klasifikací s využitím různých reanalýz jako referenčních dat. Takto komplexní přístup umožňuje odstranit vliv jednotlivých klasifikačních metod na výsledky validace modelů a ze srovnání výsledků mezi reanalýzami odhadnout míru neurčitosti výsledků (Stryhal a Huth 2017b). Prvním krokem před touto studií bylo porovnání klasifikací mezi různými atmosférickými reanalýzami s poněkud překvapivým závěrem, že zařazení jednotlivých dní do cirkulačních typů se mezi reanalýzami může značně lišit i v oblastech hustě pokrytých kvalitními daty, jako je Evropa (Stryhal a Huth 2017a). Doktorská práce J. Stryhala bude završena popisem změn cirkulačních typů v Evropě očekávaných v důsledku zesilujícího skleníkového jevu.

Další oblast, již hodláme rozvíjet, jsou klimatologické analýzy vážící se k módům proměnlivosti. V rámci již zmíněného projektu GA ČR „Dálkové vazby – hlavní stavební kameny atmosférické cirkulace“ plánujeme detailně popsat roční chod všech módů proměnlivosti, jež se vyskytují na severní polokouli, a to pomocí oddělených analýz pro klouzavá 30-denní a 90-denní období, navzájem posunutá o jeden den. Dále máme v plánu popsat všechny módy proměnlivosti vyskytující se na jižní polokouli – taková komplexní analýza v klimatologické literatuře zatím chybí; dosud byly na jižní polokouli popsány jen tři módy [tzv. jižní prstencový mód, někdy nazývaný též antarktická oscilace (např. Marshall 2003), a dva pacificko-jihoamerické módy (Mo a Higgins 1998; Mo a Paegle 2001)], přičemž předběžné analýzy potvrzují, že módů se, v závislosti na ročním období, na jižní polokouli vyskytuje nejméně šest. Na dalších úkolech týkajících se módů proměnlivosti pracují pod autorovým vedením doktorandi Vladimír Piskala a Martin Hynčica ve svých dizertačních pracích a v projektu „Časová stabilita módů proměnlivosti atmosférické cirkulace a jejich vliv na meteorologické prvky ve 20. století“ financovaném GA UK. Jedná se zejm. o srovnání módů proměnlivosti mezi různými reanalýzami a o analýzu nestacionarity vlivu módů proměnlivosti atmosférické cirkulace na přízemní klimatické prvky, jež je oproti práci Beranová a Huth (2007) a [8] rozšířena na delší časové období, více datových souborů (reanalýz) a na všechny módy proměnlivosti, a tedy zahrne i mimoevropské módy.

5. Souvislost atmosférické cirkulace s proměnlivostí sluneční aktivity

Jedním konkrétním využitím analýzy atmosférické cirkulace je výzkum odezvy klimatu na proměnlivost sluneční aktivity, zejména na její tzv. 11-letý (Schwabeho) cyklus. Sluneční aktivita v čase kolísá, což se projevuje např. ve změnách počtu slunečních skvrn (viz Obr. 6) nebo změnách radiového roku s vlnovou délkou 10,7 cm. Změny celkové sluneční iradiance během 11-letého cyklu činí přibližně 1 Wm^{-2} , což tvoří necelou desetinu procenta z průměrné hodnoty sluneční iradiance 1361 Wm^{-2} ; viz např. přehledový článek Ermolli a kol. (2013). Diskuse možných mechanismů, jejichž prostřednictvím může i tak malý signál vyvolat detekovatelné změny přízemní teploty, srážek, ale také atmosférické cirkulace, jde již mimo rámec této práce; zájemce může podrobnosti najít např. v přehledovém článku Lockwood (2012) nebo v češtině ve stručném shrnutí problematiky (Huth 2016).

Studie vlivu proměnlivosti sluneční aktivity na troposféru byly dlouho pokládány za kontroverzní, mimo jiné proto, že byly převážně založeny jen na statistických analýzách pozorovaných dat a nepředkládaly věrohodná fyzikální vysvětlení zjištěných vztahů (např. Pittcock 1978; Lockwood 2012). To se během posledních asi dvaceti let změnilo; výzkum vlivů



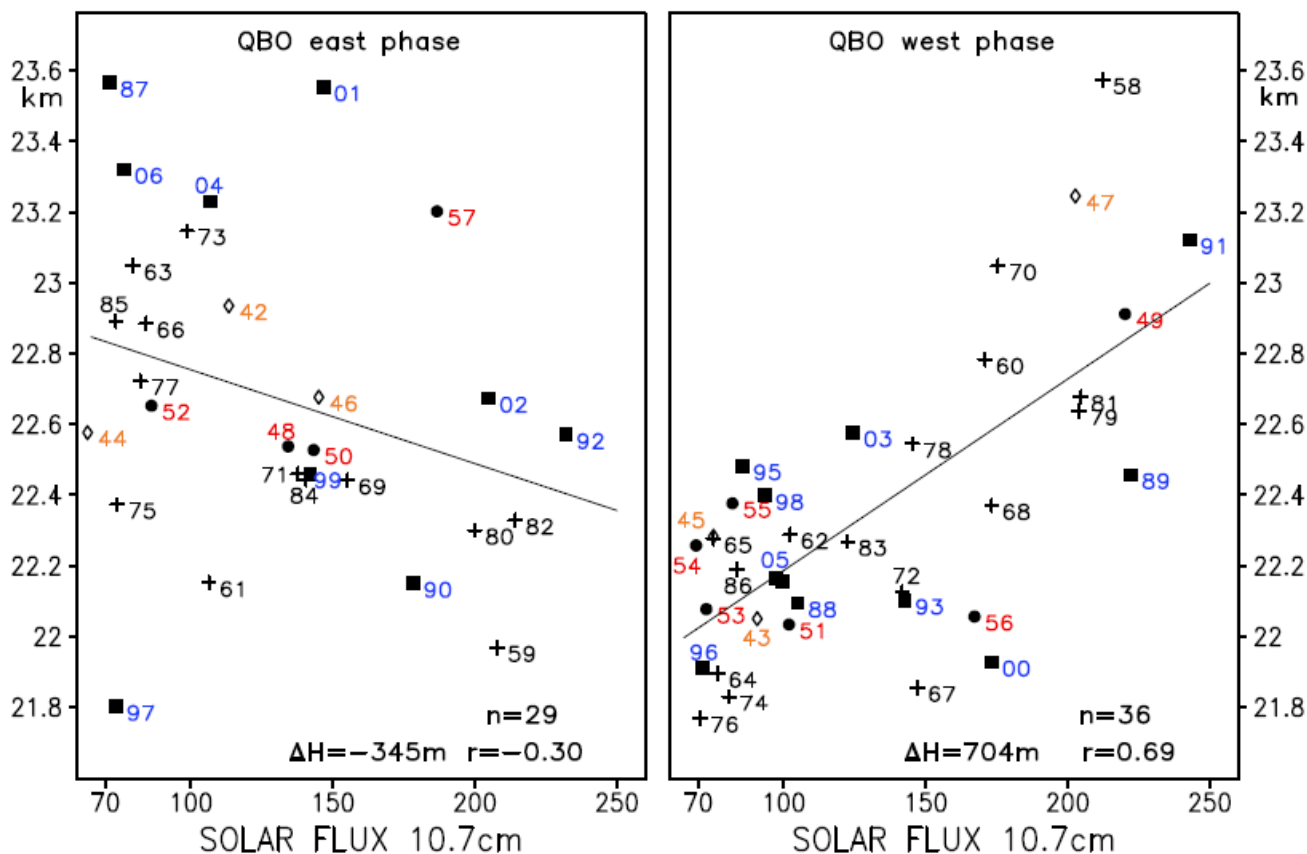
Obr. 6. Měsíční průměrné počty slunečních skvrn po r. 1749 (modře); sporadická měření před r. 1749 jsou vyznačena červenými křížky. Z dat Královské belgické observatoře zpracoval R.A.Rohde (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png)

sluneční aktivity na troposféru je nyní již pokládán za seriózní součást věd o atmosféře.

Důležitost výzkumu vztahů mezi změnami sluneční aktivity a atmosférickou cirkulací vyplývá z předpokladu, že vlivy proměnlivosti sluneční aktivity na klimatické prvky, jako je teplota a srážky, jsou pravděpodobně do značné míry zprostředkovány právě změnami atmosférické cirkulace (pokud je mi ale známo, tento předpoklad zatím nikdo neověřil).

Ukazuje se, že severoatlantická oscilace má za vysoké sluneční aktivity větší plošný rozsah (tj. nenulové korelace s indexem NAO pokrývají větší území) než za nízké aktivity (Kodera 2002; Kodera 2003). Tento poznatek posloužil jako inspirace pro článek [12], jehož hlavním cílem bylo zobecnění Koderova zjištění: lze obdobné rozdíly mezi nízkou a vysokou sluneční aktivitou zjistit (i) i tehdy, je-li NAO definováno pomocí PCA (Koderovy studie totiž vycházely ze staničního indexu NAO) a (ii) pro ostatní módy proměnlivosti? V článku [12] jsme prokázali, že sluneční aktivita má v zimě na všechny módy proměnlivosti statisticky významný vliv. Za vysoké sluneční aktivity jsou zonálně orientované módy (NAO, východoatlantický a západopacifický) aktivnější (vysvětlují větší část rozptylu), zatímco za nízké sluneční aktivity jsou aktivnější meridionálně orientované módy (pacificko-severoamerický mód a oba euroasijské módy). Některé módy dokonce za některých fází sluneční aktivity mizí: Tropicko-severopolokoulový (Tropical-Northern Hemispheric) mód se nevyskytuje za vysoké sluneční aktivity, zatímco východopacifický mód se nevyskytuje za nízké sluneční aktivity. Vysoká sluneční aktivita je spojena se zonalizací proudění zejména v oblasti Atlantiku a s větším prostorovým rozsahem většiny módů, tedy s tím, že s nimi spjaté vysoké záporné korelace se vyskytují na větší vzdálenosti. Práce [12] tak poskytla rámec dřívějším zjištěním o zesílené zonalizaci proudění za vysoké sluneční aktivity v oblasti Evropy a Atlantiku (např. Bochníček a Hejda 2002) a je v plném souladu s výsledky pozdějších studií o preferenci studených zim v Evropě za nízké sluneční aktivity (Benestad 2010; Lockwood a kol. 2010). Souvislost výsledků článku [12] s blokujícími anticyklóny ukázali Barriopedro a kol. (2008): za vysoké sluneční aktivity je doba života blokujících anticyklón kratší, což je v souladu se zvýšenou zonalitou cirkulace, a dále mají blokující anticyklóny v oblasti severního Atlantiku a Evropy větší prostorový rozsah, což je v souladu s větším prostorovým rozsahem módů proměnlivosti.

Mnohé práce prokázaly, že vliv sluneční aktivity na atmosférickou cirkulaci a teplotu ve stratosféře závisí na fázi kvazidvouleté oscilace (Quasi-Biennial Oscillation, QBO; Labitzke 1987; van Loon a Labitzke 1994; Labitzke a kol. 2006; viz Obr. 7). Nakolik se tato závislost přenáší do troposféry a ovlivňuje módy proměnlivosti, zkoumá článek [15], jenž tak je bezprostředním rozšířením článku [12]. V [15] jsme ukázali, že společný vliv proměnlivosti sluneční aktivity a fáze QBO není geograficky omezený a že se projevuje v aktivitě (tj. velikosti vysvětleného rozptylu) i poloze a intenzitě všech módů. Zatímco východní fáze QBO je spojena s potlačením zonální cirkulace, a v kombinaci s nízkou sluneční aktivitou tak vede k nejvíce meridionálně vyjádřené cirkulaci, západní fáze QBO podporuje zonální složku proudění, a ve spolupůsobení



Obr. 7. Závislost průměrné výšky hladiny 30 hPa nad severním pólem na sluneční aktivitě (vyjádřené pomocí slunečního radiového toku 10,7 cm) v únoru, období 1942-2006, odděleně pro východní (vlevo) a západní (vpravo) fázi QBO. Dvojcísle označují rok; symboly a barvy označují různé části období; r je korelační koeficient. Převzato z Labitzke a kol. (2006).

s vysokou sluneční aktivitou je proto nejsilněji spojena se zonálními formami cirkulace. Vliv QBO dále posiluje proměnlivost telekonektivity v oblasti Severního Atlantiku, kdy při nízké sluneční aktivitě a východní fázi QBO je cirkulace v této oblasti silně korelována s cirkulačními poměry nad Severní Amerikou, zatímco při vysoké sluneční aktivitě a západní fázi QBO jasně převládají korelace s cirkulací nad Evropou. Fáze QBO rovněž ovlivňuje meridionální polohu některých módů, což indikuje změnu polohy tryskového proudění.

Práce [13] studuje souvislost proměnlivosti sluneční aktivity s arktickou oscilací. V předchozích kapitolách bylo prokázáno, že AO je statistický artefakt, nikoliv reálně existující mód. Přesto představuje, coby první nerotovaná hlavní složka, účinný nástroj pro komprimaci proměnlivosti atmosférické cirkulace. Výsledky potvrzují sníženou zonalitu proudění za nízké sluneční aktivity a zvýšenou zonalitu proudění za vysoké sluneční aktivity: průměrná hodnota indexu AO je výrazně kladná pro vysokou sluneční aktivitu (přibližně pro horní kvartil hodnot sluneční aktivity), zatímco je záporná pro nízkou sluneční aktivitu. Pacifické centrum AO je na sluneční aktivitu značně citlivé: zatímco atlantické a arktické centrum se v závislosti na sluneční aktivitě mění jen málo, pacifické centrum za střední sluneční aktivity úplně mizí, a z AO se tak stává dipól. Tento fakt podporuje už dříve popsání zjištění, že pacifické centrum je nejslabším článkem AO a jeho spojení s dalšími dvěma centry je velmi volné a nestabilní a neodráží skutečnou korelační strukturu pole tlaku. Nelinearita vztahu mezi sluneční aktivitou a charakteristikami AO vede k doporučení, aby se analýzy vlivů sluneční aktivity na klima neomezovaly jen na kompozitní analýzu pro minima a maxima slunečního cyklu. Použití lineárních metod, jako např. regrese, ke stanovení vlivů sluneční aktivity na klimatické prvky je proto rovněž problematické.

Článek [14] využívá k popisu souvislostí mezi sluneční aktivitou a atmosférickou cirkulací klasifikaci Hesse-Brezowského. V souladu s ostatními pracemi je detekován pokles četností cirkulačních typů se západním prouděním za nízké sluneční aktivity, zatímco cirkulační typy s východním a severním prouděním jsou za nízké sluneční aktivity četnější než obvykle. Zjištěné změny četností cirkulačních typů v závislosti na fázi sluneční aktivity jsou v souladu se změnami cirkulace popsanými pomocí módů proměnlivosti v práci [12].

Výzkum souvislostí slunečního cyklu s atmosférickou cirkulací probíhal v letech 2011-2015 v rámci akce COST ES 1005 „Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth's climate”. Výsledkem této mezinárodní spolupráce, na níž se autor habilitační práce podílel, je mj. studie Sfířa a kol. (2015), zabývající se souvislostí sluneční aktivity s polohou akčních center atmosféry. Dílčích výsledků, jež však nebyly dostatečně průkazné na to, aby byly publikovány, dosáhla pod autorovým vedením ve svých studentských pracích Lea Paličková: v bakalářské práci (Paličková 2013) zjišťovala souvislost mezi sluneční aktivitou a charakteristikami cirkumpolárního víru ve střední troposféře, zatímco v diplomové práci (Paličková 2015) se soustředila na signál slunečního cyklu v četnostech cirkulačních typů průměrného měsíčního přízemního tlaku nad střední Evropou rekonstruovaného od konce 18. stol. podle Becka a kol. (2007). Další výzkum v tomto směru měl pod autorovým vedením probíhat v doktorském studiu Hany Kapolkové, jež bylo bohužel předčasně ukončeno. Rozpracované studie zabývající se detekcí vlivu proměnlivosti sluneční aktivity na velkém souboru klasifikací cirkulačních typů z databáze COST733 a časovou stabilitou vztahů mezi sluneční aktivitou a četností a dobou trvání cirkulačních typů podle Hesse-Brezowského tak zatím čekají na dokončení.

6. Shrnutí

Předložená habilitační práce ilustruje velkou šíři využití různých způsobů popisu atmosférické cirkulace v synoptické a dynamické klimatologii a dalších příbuzných vědních specializacích, a popisuje příspěvek autora k rozvoji tohoto oboru. Za nejdůležitější výsledky získané v souboru článků, jež tvoří tuto habilitační práci, lze označit:

- prokázání nutnosti rotovat hlavní složky, je-li cílem detekce módů proměnlivosti: jen rotované hlavní složky popisují korelační strukturu v datech;
- prokázání neexistence arktické oscilace: AO je statistický artefakt, nikoliv skutečný mód proměnlivosti popisující korelační strukturu pole přízemního tlaku;
- shrnutí znalostí o klasifikacích polí atmosférické cirkulace, nasténění hlavních směrů jejich vývoje a aplikací;
- hodnocení schopnosti klasifikací cirkulačních polí popsat přízemní klimatické prvky pro rozsáhlý soubor klasifikací, vytvořených širokým spektrem metod;
- popis dlouhodobých změn atmosférické cirkulace nad Evropou prostřednictvím trendů četností výskytu a perzistence cirkulačních typů;
- popis časové proměnlivosti vlivu módů proměnlivosti na přízemní klimatické prvky v Evropě;
- zjištění, že klasifikace polí atmosférické cirkulace nezlepšuje schopnost statistického downscalingu popisovat statistické vlastnosti přízemní teploty;
- zjištění, že korelace indexu severoatlantické oscilace s přízemními klimatickými prvky v Evropě závisí na tom, jak je severoatlantická oscilace definována;
- zjištění, že poloha a intenzita módů proměnlivosti je ovlivněna fází 11-letého cyklu sluneční aktivity i fází kvazi-dvouleté oscilace;
- prokázání vlivu 11-letého cyklu sluneční aktivity na četnosti cirkulačních typů ve střední Evropě.

7. Podíl autora na předložených pracích

Podíl R.Hutha na člancích, jež tvoří tuto habilitační práci, je následující:

[1] 100%

[2] 100%

[3] 100%

[4] 60%: příprava struktury článku, napsání větší části textu a konečná redakce celého textu

[5] 100%

[6] 70%: rozvrh práce a výpočtů, výpočty Kolmogorova-Smirnova testu, výpočty pořadí metod, grafy, napsání textu

[7] 40%: výpočty módů proměnlivosti a klasifikací, výpočty trendů pro módy proměnlivosti, část grafů, napsání části textu, redakce textu

[8] 25%: nápad, vedení práce, konzultace, interpretace části výsledků, redakce textu

[9] 80%: rozvrh práce a výpočtů, všechny výpočty mimo neuronových sítí, interpretace výsledků, grafy, napsání textu

[10] 40%: nápad, vedení práce, část výpočtů, část grafů, napsání konečné verze textu

[11] 20%: nápad, vedení práce, část interpretace výsledků, napsání konečné verze textu

[12] 60%: rozvrh práce a výpočtů, výpočty autokorelačních map, interpretace výsledků, grafy, napsání textu

[13] 90%: všechno mimo přípravy a zpracování dat o sluneční aktivitě a části interpretace výsledků

[14] 60%: rozvrh práce a výpočtů, interpretace výsledků, grafy, napsání textu

[15] 60%: rozvrh práce a výpočtů, část výpočtů, interpretace výsledků, grafy, napsání textu

Literatura

- Ambaum MHP, Hoskins BJ, Stephenson DB, 2001: Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *J. Climate* **14**, 3495-3507
- Ashok K, Behera SK, Rao SA, Weng H, Yamagata T, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* **112**, C11007
- Bárdossy A, Caspary HJ, 1990: Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theor. Appl. Climatol.* **42**, 155-167
- Bárdossy A, Stehlík J., Caspary H-J, 2002: Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. *Clim. Res.* **23**, 11-22
- Barnston AG, Livezey RE, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.* **115**, 1083-1125
- Barriopedro D, Garcia-Herrera R, Lupo AR, Hernández E, 2006: A climatology of Northern Hemisphere blocking. *J. Climate* **19**, 1042-1063
- Barriopedro D, García-Herrera R, Huth R, 2008: Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *J. Geophys. Res.* **113**, D14118
- Beck C, Jacobeit J, Jones PD, 2007: Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. *Int. J. Climatol.* **27**, 473-491
- Benestad R, Hanssen-Bauer I, Chen D, 2008: *Empirical-Statistical Downscaling*. World Scientific
- Benestad R, 2010: Low solar activity is blamed for winter chill over Europe. *Environ. Res. Lett.* **5**, 021001
- Beranová R, Huth R, 2007: Time variations of the relationships between the North Atlantic Oscillation and European winter temperature and precipitation. *Studia Geophys. Geod.* **51**, 575-590
- Bettolli ML, Peñalba OC, 2014: Synoptic sea level pressure patterns - daily rainfall relationship over the Argentine Pampas in a multi-model simulation. *Meteorol. Appl.* **21**, 376-383
- Blackmon ML, 1976: A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.* **33**, 1607-1623
- Bochníček J, Hejda P, 2002: Association between extraterrestrial phenomena and weather changes in the Northern Hemisphere in winter. *Surv. Geophys.* **23**, 303-333
- Broderick C, Fealy R, 2015: An analysis of the synoptic and climatological applicability of circulation type classifications for Ireland. *Int. J. Climatol.* **35**, 481-505
- Cahynová M, 2010: *The influence of long-term changes of atmospheric circulation on observed trends of surface climatic elements in the Czech Republic and Europe*. Doktorská dizertační práce, PŘF UK, Praha.
- Cahynová M, Huth R, 2007: Short note on inhomogeneities in the Hess-Brezowsky catalogue of circulation types. *Meteorol. čas.* **10**, 171-174
- Cahynová M, Huth R, 2009: Enhanced lifetime of atmospheric circulation types over Europe: fact or fiction? *Tellus A* **61**, 407-416
- Cahynová M, Huth R, 2010: Circulation vs. climatic changes over the Czech Republic: A comparative study based on the COST733 database of atmospheric circulation classifications. *Phys. Chem. Earth* **35**, 422-428
- Cassano EN, Lynch AH, Cassano JJ, Koslow MR, 2006: Classification of synoptic patterns in the western Arctic associated with extreme events at Barrow, Alaska, USA. *Clim. Res.* **30**, 83-97
- Cavazos T, 1997. Downscaling large-scale circulation to local winter rainfall in north-eastern Mexico. *Int. J. Climatol.* **17**, 1069-1082

- Chang C-H, Johnson NC, 2015: The continuum of wintertime Southern Hemisphere atmospheric teleconnection patterns. *J. Climate* **28**, 9507-9529
- Chen D, Hellström C, 1999: The influence of the North Atlantic Oscillation on the regional temperature variability in Sweden: spatial and temporal variations. *Tellus A* **51**, 505-516
- Chen HW, Zhang Q, Körnisch H, Chen D, 2013: A robust mode of climate variability in the Arctic: The Barents Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* **40**, 2856-2861
- Clinet S, Martin S, 1992: 700-hPa geopotential height anomalies from a statistical analysis of the French Hemis data set. *Int. J. Climatol.* **12**, 229-256
- Cohen J, Barlow M, 2005: The NAO, the AO, and global warming: How closely related? *J. Climate* **18**, 4498-4513
- Compagnucci RH, Richman MB, 2008: Can principal component analysis provide atmospheric circulation or teleconnection patterns? *Int. J. Climatol.* **28**, 703-726
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD, Matsui N, Allan RJ, Yin X, Gleason BE jr, Vose RS, Rutledge G, Bessemoulin P, Brönnimann S, Brunet M, Crouthamel RI, Grant AN, Groisman PY, Jones PD, Kruk MC, Kruger AC, Marshall GJ, Maugeri M, Mok HY, Nordli Ø, Ross TF, Trigo RM, Wang XL, Woodruff SD, Worley SJ, 2011: The twentieth century reanalysis project. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **137**, 1-28
- Demuzere M, Werner M, Van Lipzig N, Roeckner E, 2009: An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *Int J Climatol* **29**, 1796-1810
- Deser C, 2000: On the teleconnectivity of the "Arctic Oscillation." *Geophys. Res. Lett.* **27**, 779-782
- Elmore KL, Richman MB, 2001: Euclidean distance as a similarity metric for principal component analysis. *Mon. Wea. Rev.* **129**, 540-549
- Engelbrecht CJ, Landman WA, 2016: Interannual variability of seasonal rainfall over the Cape south coast of South Africa and synoptic type association. *Clim. Dyn.* **47**, 295-313
- Enke W, Spekat A, 1997: Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. *Clim. Res.* **8**, 195-207
- Ermolli I, Matthes K, Dudok de Wit T, Krivova NA, Tourpali K, Weber M, Unruh YC, Gray L, Langematz U, Pilewskie P, Rozanov E, Schmutz W, Shapiro A, Solanki SK, Woods TN 2013: Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 3945-3977
- Feldstein SB, 2002: The recent trend and variance increase of the annular mode. *J. Climate* **15**, 88-94
- Folland CK, Knight J, Linderholm HW, Fereday D, Ineson S, Hurrell JW, 2009: The summer North Atlantic oscillation: past, present and future. *J. Climate* **22**, 1082-1103
- Fyfe JC, Boer GJ, Flato GM, 1999: The Arctic and Antarctic Oscillations and their projected changes under global warming. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 1601-1604
- Gerstengarbe F-W, Werner PC, Rüge U, 1999: *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky*. Potsdam, Offenbach a.M.
- Gibson PB, Uotila P, Perkins-Kirkpatrick SK, Alexander LV, Pitman AJ, 2016: Evaluating synoptic systems in the CMIP5 climate models over the Australian region. *Clim. Dyn.* **47**, 2235-2251
- Goodess C M, Jones PD, 2002: Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. *Int. J. Climatol.* **22**, 1593-1615
- Graham NE, Diaz HF, 2001: Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **82**, 1869-1893
- Gulev SK, Zolina O, Grigoriev S, 2001: Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Clim. Dyn.* **17**, 795-809
- Gulev SK, Jung T, Ruprecht E, 2002: Climatology and interannual variability in the intensity of synoptic-scale processes in the North Atlantic from the NCEP-NCAR reanalysis data. *J. Climate* **15**, 809-828

- Hameed S, Piontkovski S, 2004: The dominant influence of the Icelandic low on the position of the Gulf Stream northwall. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L09303
- Hope PK, 2006: Projected future changes in synoptic systems influencing southwest Western Australia. *Clim. Dyn.* **26**, 765-780
- Horel JD, 1981: A rotated principal component analysis of the interannual variability of Northern Hemisphere 500 mb height field. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 2080-2092
- Horton DE, Johnson NC, Singh D, Swain DL, Rajaratnam B, Diffenbaugh NS, 2015: Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature* **522**, 465-469
- Hu Z-Z, Wu Z, 2004: The intensification and shift of the annual North Atlantic Oscillation in a global warming scenario simulation. *Tellus A* **56**, 112-124
- Hurrell JW, 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* **269**, 676-679
- Hurrell JW, van Loon H, 1997: Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim. Change* **36**, 301-326
- Huth R, 1993: An example of using obliquely rotated principal components to detect circulation types over Europe. *Meteorol. Zeit.* **2**, 285-293
- Huth R. 1996: An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *Int. J. Climatol.* **16**, 893-922
- Huth R, 1996b: Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. *Meteorol. Atmos. Phys.* **59**, 217-233
- Huth R, 1997a: Continental-scale circulation in the UKHI GCM. *J. Climate* **10**, 1545-1561
- Huth R, 1997b: Potential of continental-scale circulation for the determination of local daily surface variables. *Theor. Appl. Climatol.* **56**, 165-186
- Huth R, 2000: A circulation classification scheme applicable in GCM studies. *Theor. Appl. Climatol.* **67**, 1-18
- Huth R, 2001: Disaggregating climatic trends by classification of circulation patterns. *Int. J. Climatol.* **21**, 135-153
- Huth R, 2002: Statistical downscaling of daily temperature in central Europe. *J. Climate* **15**, 1731-1742
- Huth R, 2016: Jak Slunce ovlivňuje klima na Zemi. *Geograf. rozhledy* **26** (2), 6-7
- Huth R, Beck C, Tveito OE, 2010: Preface. *Phys. Chem. Earth* **35**, 307-308
- Itoh H, 2002: True versus apparent Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* **29**, 109
- Jacobeit J, Jönsson P, Barring L, Beck C, Ekström M, 2001: Zonal indices for Europe 1780-1995 and running correlations with temperature. *Clim. Change* **48**, 219-241
- James PM, 2006: An assessment of European synoptic variability in Hadley Centre Global Environmental models based on an objective classification of weather regimes. *Clim. Dyn.* **27**, 215-231
- Jiang NB, Scorgie Y, Hart M, Riley ML, Crawford J, Beggs PJ, Edwards GC, Chang L, Salter D, Di Virgilio G, 2017: Visualising the relationships between synoptic circulation type and air quality in Sydney, a subtropical coastal-basin environment. *Int. J. Climatol.* **37**, 1211-1228
- Johnson NC, Feldstein SB, Tremblay B, 2008: The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use of self-organizing maps. *J. Climate* **21**, 6354-6371
- Jones PD, Jónsson T, Wheeler D, 1997: Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* **17**, 1433-1450
- Jones PD, Osborn TJ, Briffa KR, 2003: Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface

- climate parameters. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M (eds). *Geophys Monograph* **134**, 51-62.
- Jung T, Hilmer M, Ruprecht E, Kleppek S, Gulev SK, Zolina O, 2003: Characteristics of the recent eastward shift of interannual NAO variability. *J. Climate* **16**, 3371-3382
- Kayano MT, 2003: Low-level high-frequency modes in the Tropical Atlantic and their relation to precipitation in the equatorial South America. *Meteorol. Atmos. Phys.* **83**, 263-276
- Kidson JW, 1994: Relationship of New Zealand daily and monthly weather patterns to synoptic weather types. *Int. J. Climatol.* **14**, 723-737
- Kodera K, 2002: Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO. *Geophys. Res. Lett.* **29**, doi: 10.1029/2001GL014557
- Kodera K, 2003: Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900-1999. *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1175
- Kohyama T, Hartmann DL, 2016: Antarctic sea ice response to weather and climate modes of variability. *J. Climate* **29**, 721-741
- Kousky VE, Bell GD, 1992: Atlas of Southern Hemisphere 500 mb teleconnection Patterns derived from National Meteorological Center Analyses. *NOAA Atlas* **9**, 1-20
- Krichak SO, Alpert P, 2005: Decadal trends in the East Atlantic-West Russia pattern and Mediterranean precipitation. *Int. J. Climatol.* **25**, 183-192
- Kuzmina SI, Bengtsson L, Johannessen OM, Drange H, Bobylev LP, Miles MW, 2005: The North Atlantic Oscillation and greenhouse-gas forcing. *Geophys. Res. Lett.* **32**, L04703
- Kysely J, Domonkos P, 2006: Recent increase in persistence of atmospheric circulation over Europe: comparison with long-term variations since 1881. *Int. J. Climatol.* **26**, 461-483
- Labitzke K, 1987: Sunspots, the QBO and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophys. Res. Lett.* **14**, 535-537
- Labitzke K, Kunze M, Brönnimann S, 2006: Sunspots, the QBO and the stratosphere in the North Polar Region - 20 years later. *Meteorol. Zeit.* **15**, 355-363
- Leathers DJ, Yarnal B, Palecki MA, 1991: The Pacific / North American teleconnection pattern and United States climate. Part I: Regional temperature and precipitation associations. *J. Climate* **4**, 517-528
- Li X, Sailor D, 2000: Application of tree-structured regression for regional precipitation prediction using general circulation model output. *Clim. Res.* **16**, 17-30
- Lian T, Chen D, 2012: An evaluation of rotated EOF analysis and its application to Tropical Pacific SST variability. *J. Climate* **25**, 5361-5373
- Liu Y, Wang L, Zhou W, Chen W, 2014: Three Eurasian teleconnection patterns: spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies. *Clim. Dyn.* **42**, 2817-2839
- Lockwood M, 2012: Solar influence on global and regional climates. *Surv. Geophys.* **33**, 503-534
- Lockwood M, Harrison RG, Woolings T, Solanki SK, 2010: Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environ. Res. Lett.* **5**, 02400
- Lund IA, 1963: Map-pattern classification by statistical methods. *J. Appl. Meteorol.* **2**, 56-65
- Mächel H, Kapala A, Flohn H, 1998: Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *Int. J. Climatol.* **18**, 1-22
- Malberg H, Böken G, 1997: Die Winter- und Sommertemperaturen in Berlin seit 1929 und ihr Zusammenhang mit der Nordatlantischen Oszillation (NAO). *Meteorol. Zeit.* **6**, 230-234
- Marshall GJ, 2003: Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *J. Climate* **16**, 4134-4143

- McKendry IG, Stahl K, Moore RD, 2006: Synoptic sea-level pressure patterns generated by a general circulation model: comparison with the types derived from NCEP/NCAR re-analysis and implications for downscaling. *Int. J. Climatol.* **26**, 1727-1736
- Mo KC, Higgins RW, 1998: The Pacific-South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.* **126**, 1581-1596
- Mo KC, Paegle JN, 2001: The Pacific-South American modes and their downstream effects. *Int. J. Climatol.* **21**, 1211-1229
- Moore GWK, Renfrew IA, 2012: Cold European winters: interplay between the NAO and the East Atlantic mode. *Atmos. Sci. Lett.* **13**, 1-8
- North GR, Bell TC, Cahalan RF, Moeng FJ, 1982: Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.* **110**, 699-706
- O'Lenic EA, Livezey RE, 1988: Practical considerations in the use of rotated principal component analysis (RPCA) in diagnostic studies of upper-air height fields. *Mon Wea Rev* **116**, 1682-1689
- Osborn TJ, 2004: Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. *Clim. Dyn.* **22**, 605-623
- Ostermeier GM, Wallace JM, 2003. Trends in North Atlantic Oscillation - Northern Hemisphere Annular Mode during the twentieth century. *J. Climate* **16**, 336-341
- Paegle JN, Kierulff LP, 1974: Synoptic climatology of 500-mb winter flow types. *J. Appl. Meteorol.* **13**, 205-212
- Paličková L, 2013: Vlivy sluneční aktivity na vlastnosti cirkumpolárního víru severní polokoule. Bakalářská práce, PŘF UK, Praha.
- Paličková L, 2015: Časová stabilita vlivů 11-letého slunečního cyklu na cirkulační poměry ve střední Evropě. Diplomová práce, PŘF UK, Praha.
- Pastor MA, Casado MJ, 2012: Use of circulation types classifications to evaluate AR4 climate models over the Euro-Atlantic region. *Clim. Dyn.* **39**, 2059-2077
- Philipp A, Bartholy J, Beck C, Erpicum M, Esteban P, Fettweis X, Huth R, James P, Jourdain S, Kreienkamp F, Krennert T, Lykoudis S, Michalides SC, Pianko-Kluczynska K, Post P, Álvarez DR, Schiemann R, Spekat A, Tymvios FS, 2010: COST733cat – a database of weather and circulation type classifications. *Phys. Chem. Earth* **35**, 360-373
- Philipp A, Beck C, Huth R, Jacobeit J, 2016: Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol.* **36**, 2673-2691
- Pittock AB, 1978: A critical look at long-term Sun-weather relationships. *Rev. Geophys.* **16**, 400-420
- Poli P, Hersbach H, Dee DP, Berrisford P, Simmons AJ, Vitart F, Laloyaux P, Tan DGH, Peubey C, Thépaut J-N, Trémolet Y, Hólm EV, Bonavita M, Isaksen I, Fisher M, 2016: ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *J. Climate* **29**, 4083-4097
- Portis DH, Walsh JE, El Hamly M, Lamb PJ, 2001: Seasonality of the North Atlantic Oscillation. *J. Climate* **14**, 2069-2078
- Reusch DB, Alley RB, Hewitson BC, 2007: North Atlantic climate variability from a self-organizing map perspective. *J. Geophys. Res.* **112**, D02104
- Reusch DB, 2010: Nonlinear climatology and paleoclimatology: Capturing patterns of variability and change with Self-Organizing Maps. *Phys. Chem. Earth* **35**, 329-340
- Richman MB, 1986: Rotation of principal components. *J. Climatol.* **6**, 293-335.
- Richman MB, Lamb PJ, 1985: Climatic pattern analysis of three- and seven-day summer rainfall in the Central United States: Some methodological considerations and a regionalization. *J. Clim. Appl. Meteorol.* **24**, 1325-1343

- Rogers JC, 1984: The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.* **112**, 1999-2015
- Rudeva I, Simmonds I, 2015: Variability and trends of global atmospheric frontal activity and links with large-scale modes of variability. *J. Climate* **28**, 3311-3330
- Saunders I R, Byrne JM, 1999: Analysis of blocking events from observations and ECHAM model simulations. *Int. J. Climatol.* **19**, 1165-1176
- Schuenemann KC, Cassano JJ, Finnis J, 2009: Synoptic forcing of precipitation over Greenland: Climatology for 1961-99. *J. Hydrometeorol.* **10**, 60-78
- Selten FM, Branstator GW, Dijkstra HA, Kliphuis M, 2004: Tropical origins for recent and future Northern Hemisphere climate change. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L21205
- Sfîcă L, Voiculescu M, Huth R, 2015: The influence of solar activity on centers of atmospheric circulation in North Atlantic. *Ann. Geophys.* **33**, 207-215
- Sheridan SC, Lee CC, 2011: The self-organizing map in synoptic climatological research. *Progr. Phys. Geogr.* **35**, 109-119
- Skeie P, 2000: Meridional flow variability over the Nordic seas in the Arctic Oscillation framework. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 2569-2572
- Smoliak BV, Wallace JM, 2015: On the leading patterns of Northern Hemisphere sea level pressure variability. *J. Atmos. Sci.* **72**, 3469-3486
- Stefanicki G, Talkner P, Weber RO, 1998: Frequency changes of weather types in the Alpine region since 1945. *Theor. Appl. Climatol.* **60**, 47-61
- Stryhal J, Huth R, 2016: Klasifikace atmosférické cirkulace. *Geografie* **121**, 300-323
- Stryhal J, Huth R, 2017a: Classifications of winter Euro-Atlantic circulation patterns: an intercomparison of five atmospheric reanalyses. *J. Climate* **30**, 7847-7861
- Stryhal J, Huth R, 2017b: Classifications of atmospheric circulation patterns: Validation of CMIP5 GCMs over Europe and the North Atlantic. *Clim. Dyn.* (v recenzním řízení)
- Sýkorová P, 2013: Využitelnost synoptické typizace podle Hesse a Brezowského k popisu klimatických prvků v Evropě. Bakalářská práce, PŘF UK, Praha
- Thompson DWJ, Wallace JM, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1297-1300
- Tremblay L-B, 2001: Can we consider the Arctic Oscillation independently from the Barents Oscillation? *Geophys. Res. Lett.* **28**, 4227-4230
- Trigo RM, Osborn TJ, Corte-Real JM, 2002: The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Clim. Res.* **20**, 9-17
- Trigo RM, Pozo-Vázquez D, Osborn TJ, Castro-Díez Y, Gámiz-Fortis S, Esteban-Parra MJ, 2004: North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* **24**, 925-944
- Tveito OE, Huth R, 2016: Editorial. Circulation-type classifications in Europe: results of the COST 733 Action. *Int. J. Climatol.* **36**, 2671-2672
- van Loon H, Labitzke K, 1994: The 10-12 year atmospheric oscillation. *Meteorol. Zeit.* **3**, 259-266
- van Loon H, Rogers JC, 1978: The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part I: General description. *Mon Wea Rev* **106**, 296-310
- Vejmelka M, Pokorná L, Hlinka J, Hartman D, Jajcay N, Paluš M, 2015: Non-random correlation structures and dimensionality reduction in multivariate climate data. *Clim. Dyn.* **44**, 2663-2682

- Wallace JM, Gutzler DS, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the North Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 784-812
- Werner PC, Gerstengarbe F-W, Fraedrich K, Oesterle H, 2000: Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *Int. J. Climatol.* **20**, 463-471
- Wiedenmann JM, Lupo AR, Mokhov II, Tikhonova EA, 2002: The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic. *J. Climate* **15**, 3459-3473
- Yarnal B, 1985: A 500 mb synoptic climatology of Pacific north-west coast winters in relation to climatic variability, 1948-1949 to 1977-1978. *J. Climatol.* **5**, 237-252
- Yuan JC, Tan BK, Feldstein SB, Lee SY, 2015: Wintertime North Pacific teleconnection patterns: Seasonal and interannual variability. *J. Climate* **28**, 8247-8263
- Zhang W, Li J, Zhao X, 2010: Sea surface temperature cooling mode in the Pacific cold tongue. *J. Geophys. Res.* **115**, C12042
- Zhou S, Miller AJ, Wang J, Angell JK, 2001: Trends of NAO and AO and their associations with tropospheric processes. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 4107-4110